

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

MARINE ELECTRICAL GENERATING COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья
УДК 62–503.5
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-65-72>

Идентификация процессов судового оборудования методами интроспективного анализа

*Владимир Алексеевич Доровской^{1✉}, Владислав Александрович Кучеренко²,
Елена Геннадьевна Зинченко³, Кирилл Сергеевич Чернобай⁴*

¹⁻³*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Россия, esiap@mail.ru*

⁴*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Для интроспективной идентификации системы автоматического регулирования (САР) двигателя постоянного тока специально разработана упрощенная методика исследования оптимизации линейной САР. Методика основана на применении компьютерной моделирующей программы MATLAB, позволяющей без труда получать переходную функцию модели САР в условиях нескольких известных свойств САР, и методе направленного поиска. Работа выполняется в течение трех этапов в соответствии с поставленными задачами. Рассматриваются заготовки моделей, в которых исследователь должен задать значения параметров элементов, запустить моделирование и, контролируя вид переходной функции, подобрать значения оптимальных коэффициентов усиления регуляторов. Постоянная времени ПИ-регулятора выбирается равной наибольшей постоянной времени элементов контура САР. Обычно это постоянная времени объекта управления, в данном случае рассматривается постоянная времени двигателя постоянного тока. Оптимальный выбор системы определит и задачи идентификации, в результате чего можно будет правильно осуществить выбор технологического объекта конкретной САР, его управляющей величиной и возмущения для обеспечения решения стоящей перед САР задачи. Статические характеристики объекта определяют зависимость управляемой величины от управляющей и возмущений; в некоторых, наиболее простых случаях они могут быть получены аналитически, исходя из физических законов, связывающих управляемую величину со входными параметрами. Параметрическая оптимизация показателей идентифицирована и отработана на примерах моделирования в имитационном пакете и позволяет судить о корректности моделирования с минимальным значением ошибки.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, анализ, оптимизация, параметры, структура, двигатель постоянного тока, частота вращения вала

Для цитирования: Доровской В. А., Кучеренко В. А., Зинченко Е. Г., Чернобай К. С. Идентификация процессов судового оборудования методами интроспективного анализа // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 65–72. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-65-72>.

Original article

Identification of ship equipment processes by methods of introspective analysis

Vladimir A. Dorovskoy^{1✉}, Vladislav A. Kucherenko², Elena G. Zinchenko³, Kirill S. Chernobai⁴

¹⁻³*Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia, esiap@mail.ru*

⁴*Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. For introspective identification of the automatic control system (ACS) of a DC motor there has been developed a specific simplified technique of studying the optimization of a linear automatic control system. The technique is based on using the MATLAB computer simulation program, which helps to easily obtain the transition function of the ACS model, on the understanding of a few ACS properties and using the directed search method. The work can be done in three stages, in accordance with the tasks. Draft models are considered, in which the researcher must set up the parameters of the elements, activate the simulation process and keeping under control the type of the transient function select the values of the optimal gains of the controllers. The time constant of the PI controller is chosen equal to the largest time constant of the ACS loop elements. It is often the time constant of the control object. In this case it is the time constant of a DC motor. The optimal choice of the system will also determine the tasks of identification, due to which it will be possible to correctly select a technological object by a specific ACS, its control variable and disturbance to provide the solution of the problem facing ACS. The static characteristics of an object determine the dependence of the controlled variable on the controlling variable and disturbances. In simple cases they can be obtained analytically by using the physical laws that link the controlled variable to the input parameters. Parametric optimization of indicators has been identified and tested on simulation examples in a simulation package and makes it possible to judge the correctness of simulation with a minimum error value.

Keywords: automatic control system, analysis, optimization, parameters, structure, DC engine, shaft rotation speed

For citation: Dorovskoy V. A., Kucherenko V. A., Zinchenko E. G., Chernobai K. S. Identification of ship equipment processes by methods of introspective analysis. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;2:65-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-65-72>.

Введение

В настоящее время обеспечение достаточной надежности судового оборудования и механизмов представляет собой проблему государственной важности. Это связано во многих случаях с аварийными ситуациями, возникающими при эксплуатации разнообразных технических средств и оборудования, исчерпавших свой ресурс вследствие старения материалов и конструкций, а также из-за предельного изнашивания ответственных деталей и проблем по импортозамещению.

Целью настоящей статьи является оптимизация линейной системы автоматического регулирования (САР) по упрощенной методике исследований. *Задачи:* вычисление параметров модели элементов и построение модели САР частоты вращения вала (ЧВВ) двигателя постоянного тока (ДПТ); оптимизация методом направленного поиска ко-

эффициента усиления П-регулятора; введение в контур САР ПИ-регулятора и оптимизация его параметров; установление характеристик асинхронного двигателя [1].

Вычисление параметров моделей элементов и построение модели САР ЧВВ ДПТ «Волна» осуществляется путем оценки работоспособности и качества исходной САР (системы с исходными значениями параметров элементов). Сопутствующие решаемые задачи – вычисление параметров моделей элементов САР и построение объектной модели САР.

Порядок вычисления параметров звеньев

Функциональная схема САР ЧВВ ДПТ (рис. 1) иллюстрирует, из каких физических элементов построена САР и каким образом они взаимодействуют.

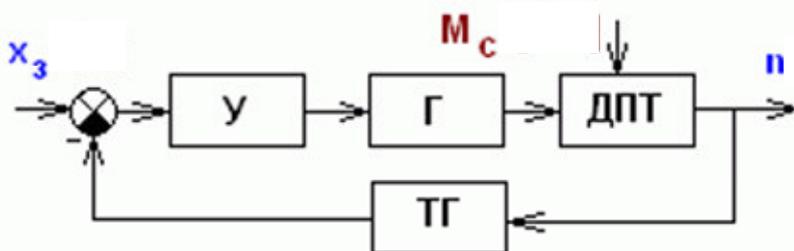


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока: У – усилитель; Г – генератор постоянного тока; ДПТ – двигатель постоянного тока; ТГ – тахогенератор; M_c – момент сопротивления на валу двигателя, Н·м; n – частота вращения вала двигателя, об/с; x_3 – напряжение задания, В

Fig. 1. Functional diagram of the automatic control system of the DC motor shaft speed: У - amplifier; Г - DC generator; ДПТ - DC motor; ТГ - tachogenerator; M_c - moment of resistance on the motor shaft, N·m; n - frequency of the motor shaft rotation, rev/s; x_3 - task voltage, V

Система автоматического регулирования ЧВВ ДПТ предназначена для слежения и стабилизации, работая правильно, она в режиме слежения заставляет управляемую величину, в данном случае частоту вращения n , об/с, вала ДПТ быть пропорциональной задающей величине, в данном случае напряжению задания x_3 . Осуществляя стабилизацию, САР компенсирует (целиком или в большой степени) влияние возмущения, в данном случае момента сопротивления M_c , Н·м, на валу ДПТ, на частоту вращения вала. Поэтому в статике, т. е. когда воздействия постоянны или меняются очень медленно, правильно работающая САР описывается уравнением и определяется функциональной схемой САР (рис. 1). Система автоматического регулирования представляет собой замкнутый контур главной обратной связи, который осуществляет управление по отклонению.

На рис. 1 n (управляемая величина) = $k_{\text{САР}} \cdot x_3$ (пропорциональна задающей) + $0 \cdot x_{\text{возм}}$ (и не зависит от возмущений).

Польза САР состоит в том, что оператор, установив значение задания, в том числе дистанционно, оперируя маломощным сигналом, может далее не заниматься управлением объекта, в том числе и мощного. Система автоматического регулирования сама будет поддерживать требуемое значение частоты вращения, компенсируя изменения возмущения, т. е. момента торможения на валу. Требуется построить структурно-математическую модель САР, элементы которой соответствуют физическим блокам САР и осуществляют математические операции над поступающими на них сигналами так же, как функциональные блоки реагируют на воздействия на них. Сигналы представляют собой математические модели воздействий в реальных САР и являются в общем случае функциями времени. Тип и параметры моделей элементов САР даны в задании в виде исходных данных.

Построение объектной модели (структурной схемы) системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока «Волна»

Подставив полученные значения параметров в соответствующие блоки и соединив их, получим структурную модель исходной САР [2] – структурную схему САР ЧВВ ДПТ. Переходная функция САР (ее реакция на пробное задание, ступенчатое единичное воздействие) имеет колебательный характер с возрастающей со временем амплитудой, что означает неустойчивость исходной САР. Вначале возмущение на ДПТ не подано, следует добиться удовлетворительного качества САР в режиме слежения. Запустив моделирование, можно убедиться, что исходная САР ЧВВ ДПТ

неустойчива, неработоспособна, поэтому требует коррекции.

1. Коррекция коэффициента усиления контура.

Цель – стабилизировать САР, т. е. сделать ее устойчивой, и добиться удовлетворительного качества переходного режима при возможно меньшей ошибке установившегося режима путем уменьшения коэффициента усиления П-регулятора. Предлагаемая простейшая методика стабилизации САР основывается на том, что уменьшение коэффициента усиления контура посредством уменьшения коэффициента усиления П-регулятора приводит, с одной стороны, к улучшению свойств неустойчивой САР в переходном режиме, а именно делает неустойчивую САР устойчивой, уменьшает колебательность переходной функции САР и даже может сделать ее монотонной. Наилучший переходный процесс – апериодический, с перерегулированием в 5 %; удовлетворительный – с перерегулированием в 20 %. С другой стороны, уменьшение коэффициента усиления контура приводит к увеличению относительной ошибки регулирования в установившемся режиме (например, когда входное воздействие САР, т. е. задание, достаточно длительное время остается постоянным). Таким образом, качество установившегося режима САР с уменьшением коэффициента усиления контура ухудшается. Отличное значение установившейся ошибки – 0 %, хорошее – 1 %, удовлетворительное – 10 %. Следовательно, существует наилучшее, оптимальное значение коэффициента усиления контура, при котором минимизированы ошибки как переходного, так и установившегося режима. Однако этот оптимум совокупного качества может и не удовлетворить требования заказчика САР [3]. Поскольку построение в MATLAB переходной функции САР осуществляется очень легко, то изменяя коэффициент усиления П-регулятора и контролируя получаемую переходную функцию, можно методом проб и ошибок подобрать достаточно хорошее значение коэффициента, обеспечивающего, по крайней мере, удовлетворительное качество переходного режима, а в лучшем случае и установившегося режима работы САР.

Результат предварительной коррекции САР ЧВВ ДПТ «Волна» достигнут подбором значения П-регулятора с контролем переходного процесса. Переходный процесс – удовлетворительный (перерегулирование – 20 %), установившийся – неудовлетворительный. Относительная ошибка установившегося режима определяется в модели как отношение установившейся ошибки к величине выходного сигнала идеальной САР, выраженной в процентах. Таким образом, исходная САР стабилизирована, сделана устойчивой. Однако согласно рис. 1 изменением только коэффициента усиления

Доровской В. А., Кучеренко В. А., Зинченко Е. Г., Чернобай К. С. Идентификация процессов судового оборудования методами интроспективного анализа

П-регулятора не удастся в данном случае одновременно получить хорошее качество как переходного, так и установившегося режима: и перерегулирование, и ошибка установившегося режима велики. Для улучшения свойств САР в ее контур следует ввести ПИ-регулятор.

2. Коррекция САР введением в контур ПИ-регулятора.

Цель – добиться удовлетворительного качества САР как в переходном, так и в установившемся режиме путем введения в контур ПИ-регулятора и оптимизации его параметров. Задачи: ввести в контур ПИ-регулятор и подобрать такие значения его параметров, чтобы перерегулирование составило 5 %; оценить показатели качества оптимизированной САР [4].

Достоинство ПИ-регулятора состоит в том, что он может компенсировать одну из инерционностей контура благодаря наличию в числителе передаточной функции ПИ-регулятора так называемого форсирующего множителя $(pT_f + 1)$. Кроме того, ввиду наличия в ПИ-регуляторе интегратора, он делает статическую САР астатической, т. е. при отслеживании постоянного сигнала ошибка регулирования в установившемся режиме будет строго

равна нулю. Предлагаемая методика состоит в задании постоянной времени ПИ-регулятора, равной наибольшей постоянной времени элементов контура, и задании предварительного значения коэффициента усиления ПИ-регулятора, равного 0,5 (эмпирическое значение, рекомендуемое Б. Т. Федосовым), с последующим уточнением этого значения путем проб и ошибок с контролем по виду переходной функции САР. В исследуемой САР наибольшая постоянная времени у ДПТ – это коэффициент у слагаемого первой степени в знаменателе передаточной функции ДПТ. Ее значение $T = 1,5$ с, и именно ее следует скомпенсировать ПИ-регулятором. Таким образом, постоянную времени следует задать ПИ-регулятору [5].

В данном случае не потребовалось изменять коэффициент усиления ПИ-регулятора, поскольку перерегулирование составило требуемую величину – 5 %. На рис. 2 красная линия касается синей, но не превышает ее. Если касания нет, то в модели следует слегка изменять (как в большую, так и в меньшую сторону) коэффициент усиления ПИ-регулятора, добиваясь касания, что будет способствовать получению его оптимального значения, а с ним и оптимальной САР.

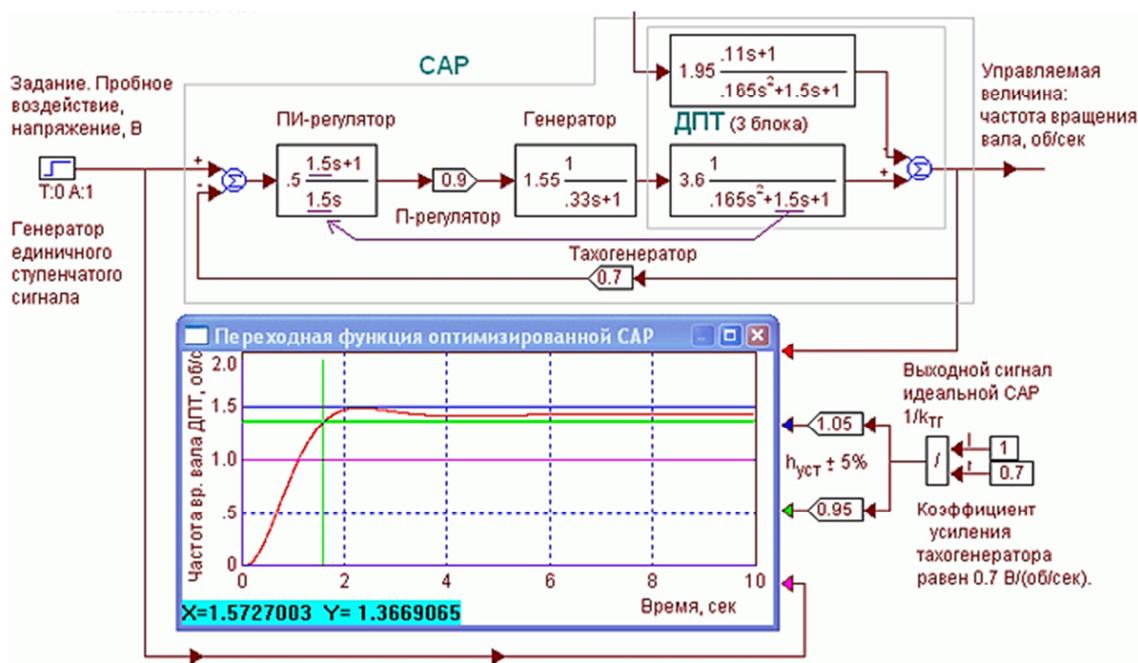


Рис. 2. Модель системы автоматического регулирования с оптимизированными параметрами ПИ-регулятора обеспечивает качественное слежение как в переходном, так и в установившемся режиме (время регулирования – 1,6 с; перерегулирование – 5 %; ошибка регулирования в статике – 0)

Fig. 2. The automatic control system model with optimized parameters of the PI-controller provides high-quality tracking in both transient and steady modes (regulation time - 1.6 s; overshoot - 5%; control error in statics - 0)

3. Оценка запаса устойчивости оптимизированной САР по амплитуде.

Дополнительно (не обязательно) можно определить запас устойчивости оптимизированной САР по амплитуде (другими словами, по коэффициенту усиления контура). Это значение запаса устойчивости позволит точнее судить о потенциальных возможностях САР при изменении в результате действия внешних вредных факторов коэффициента усиления контура. Изменяя коэффициент усиления

ПИ-регулятора схемы на рис. 3 (здесь он оптимальный и равен 0,5) в сторону увеличения, нужно добиться, чтобы переходная функция приобрела колебательную компоненту с медленно изменяющейся (увеличивающейся или уменьшающейся) амплитудой. При этом полезно увеличить время моделирования в 5–10 раз (Simulate – Simulation Properties – End – 50 с). Осциллограмма примет вид, сходный с приведенным на рис. 3.



Рис. 3. Переходная функция системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока «Волна»

Fig. 3. Transient function of the automatic control system of the shaft rotation frequency of the DC motor Volna

Запас устойчивости оптимизированной САР по амплитуде (по коэффициенту усиления контура) $\beta = 4,55 / 0,5 = 9,1$ раз, или $20 \lg(9,1) = 19,2$ дБ. Обычно запас устойчивости у качественных САР находится в диапазоне 12–20 дБ.

4. Проверка качества оптимизированной САР в режимах слежения и стабилизации.

В нулевой момент времени задание резко изменяется с 0 до 1. Управляемая величина – частота вращения вала (красная линия на рис. 4) – примерно за 1,6 с достигает значения 1,4 об/с, переходный режим слежения заканчивается, начинается установившийся режим слежения. Через 7 с после начала моделирования на САР поступает возмущение, равное 0,5 Н·м, что приводит вначале к существенному уменьшению частоты вращения, до 1,1 об/с. Однако вследствие работы контура, устремляющего ошибку регулирования к нулю путем увеличения напряжения на якоре ДПТ, частота вращения вала последнего увеличивается и принимает значение, определяемое заданием: САР компенсирует влияние возмущения на частоту вращения вала. Компенсация проходит за 3,2 с, т. е. стабилизация происходит примерно вдвое медленнее, чем переходный процесс при отслежи-

вании ступенчатого изменения задания. Система автоматического регулирования следит и стабилизирует [6], остается убедиться в том, что САР способна осуществлять не только слежение, но и стабилизацию.

Система автоматического регулирования вынуждает управляющую величину быть пропорциональной заданию и компенсирует влияние возмущения на частоту вращения вала. В статическом режиме, когда задающая и возмущающая величины достаточно долго не изменяются, САР ЧВВ ДПТ описывается уравнением $n = k_{САР} \cdot x_3 + 0 \cdot x_{возм}$; $k_{САР} = 1 / k_{ТР} = 1 / 0,7 = 1,49$, исходя из чего получим $n = 1,49 \cdot x_3$, где n – управляемая величина, частота вращения вала ДПТ, об/с; x_3 – задающая величина.

Динамическая модель асинхронного двигателя для случаев прямого пуска и скалярного управления может быть с успехом заменена на квазидинамическую (полудинамическую, почти динамическую, механодинамическую) модель. Механодинамическая модель основывается на втором законе Ньютона, сформулированном для вращения: угловое ускорение ротора ε , рад/с², пропорционально моменту вращения, равному разности электромаг-

нитного вращающего момента M , Н·м, и момента сопротивления M_c :

$$\varepsilon = \frac{1}{J}(M - M_c),$$

где J – момент инерции ротора с приведенным к нему моментом инерции нагрузки, кг/м².

Если управляемой величиной является частота вращения вала (ω , рад/с), то она находится интегрированием углового ускорения по времени:

$$\omega = \int_0^t \varepsilon(t) dt.$$



Рис. 4. Оптимизированная система автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока

Fig. 4. Optimized automatic control system of the DC motor rotation speed

Электромагнитный момент вращения M в предлагаемой модели определяется по формуле Клосса, которая может быть модифицирована для учета возможного изменения частоты и напряжения сети питания двигателя:

$$M(n, f, U) = \frac{2M_{кр}(U / U_{ном})^2 / (f / f_{ном})^2}{\frac{n_0 - n}{\Delta n_{кр}} + \frac{\Delta n_{кр}}{n_0 - n}},$$

где n – частота вращения вала, об/с; f – частота трехфазного напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного двигателя, Гц; U – действующее значение напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного двигателя, В; $M_{кр}$ – номинальный критический момент, Н·м, т. е. максимальный электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем при номинальных значениях напряжения ($U_{ном}$) и частоты ($f_{ном}$) сети питания асинхронного двигателя; n_0 – частота вращения вала ротора на холостом ходу, об/с, которая определяется частотой сети f и числом p пар полюсов двигателя: $n_0 = f / p$; $\Delta n_{кр}$ – абсолютное значение скольжения ротора относительно вращающегося магнитного поля, об/с [7].

Модель двигателя заключена в составной блок. Значение абсолютного скольжения не зависит от частоты напряжения сети. Пусковой момент возрастает с понижением частоты сети: от номинального значения до абсолютного критического значе-

ния скольжения двигателя. Пуск на пониженной частоте при пониженном напряжении предпочтительнее прямого пуска при номинальной частоте сети. Абсолютное значение критической частоты скольжения не зависит от частоты сети. Отметим, что в полной модели отражается тот факт, что при уменьшении величины напряжения пропорционально уменьшению частоты сети от номинального значения критический момент несколько падает, по сравнению с его значением в номинальном режиме [8].

Важным этапом моделирования технологического объекта управления является выбор с точки зрения конкретной задачи, поставленной перед САР в ракурсе, при котором технологический объект рассматривается как объект управления, управляемой, управляющей и возмущающих величин и установление статических и динамических причинно-следственных связей между ними. При проектировании или модернизации отдельной САР для объекта, имеющего несколько управляемых и управляющих величин, необходимо изучить и обосновать эти несколько управляемых и управляющих величин, а в случае необходимости и пересмотреть САР, управляющих объектом. Оптимальный выбор САР определит и задачи каждой из них, в результате чего можно будет правильно определиться с ракурсом, в котором воспринимается технологический объект конкретной САР, его управляющей величиной и возмущением для обеспечения решения задачи, стоящей перед САР. Ста-

тические характеристики объекта определяют зависимость управляемой величины от управляющей, зависимость возмущений и в простых случаях могут быть получены аналитически, исходя из физических законов, связывающих управляемую величину с входными.

Физические величины, отображаемые стрелками на виртуальной аналоговой модели САР, на реальном объекте соответствуют некоторым точкам, разнесенным в пространстве, где осуществляется их измерение (контроль) [9]. В ряде случаев полная динамическая модель объекта может быть получена из линейной динамической модели обратной заменой линейной статической модели, т. е. сумматора с усилителями, на полную статическую модель [10]. Такое простое построение требует обоснования состоятельности полученной полной модели.

Заключение

Система автоматического регулирования, воздействуя на объект управления, вынуждает управляемую величину объекта, а именно частоту вращения вала ДПТ, быть пропорциональной задающей величине, несмотря на изменения возмуще-

ния, которым в данном случае является момент торможения на валу ДПТ. Польза от САР состоит в том, что оператор, установив значение задания, в том числе дистанционно, оперируя маломощным сигналом, может далее не заниматься управлением объекта, в том числе и мощного. Система автоматического регулирования самостоятельно будет поддерживать требуемое значение частоты вращения, компенсируя изменения возмущения, т. е. момента торможения на валу. Простейший метод определения оптимальных настроечных параметров ПИ-регулятора – это метод направленного подбора коэффициента усиления ПИ-регулятора с контролем качества САР по ее переходной функции. Постоянная времени ПИ-регулятора выбирается равной наибольшей постоянной времени элементов исходной САР. Эту постоянную времени можно найти, анализируя передаточные функции элементов исходной САР [11]. Благоприятным начальным приближением коэффициента усиления ПИ-регулятора для предварительно оптимизированной САР с П-регулятором является значение 0,5, полученное эмпирически на основе анализа многих САР, имеющих предпочтительное качество регулирования.

Список источников

1. Ланцош К. Вариационные принципы механики. М.: Мир, 1965. 408 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. М.: Наука; Глав. ред. физ.-мат. лит., 1986. Т. 2. Теория поля. 736 с.
3. Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Динамика негolonомных систем. М.: Наука, 1967. 519 с.
4. Черный С. Г., Ерофеев П. А., Доровской В. А., Будник В. Ю. Разработка алгоритмов идентификации образов сигналов и объектов на морском транспорте // Судостроение. 2021. № 1 (854). С. 50–54.
5. Sokolov S. S., Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., Nyrkov A. P., Mamunts D. G. Dynamics models of synchronized piecewise linear discrete chaotic systems of high order // Symmetry. 2019. V. 11. N. 2. P. 236.
6. Marsden J. E., West M. Discrete mechanics and variational integrators // Acta Numerica. Cambridge University Press, 2001. P. 357–514.
7. Черный С. Г. Параметрическая идентификация компонентов интеллектуальных систем на платформе современных микроконтроллеров // Науч.-техн. информ.

- Сер. 2: Информационные процессы и системы. 2021. № 7. С. 19–24.
8. Жуков В. А., Буцанец А. А., Шербан С. А. Средства контроля энергетических установок судов малого водоизмещения // Мор. радиоэлектроника. 2020. № 1 (71). С. 26–29.
9. Вынгра А. В., Комиссаров Д. Р., Черный С. Г. Физическое моделирование автоматизированной системы управления креном судна // Системы упр. и обработки информ. 2020. № 3 (50). С. 40–49.
10. Chernyi S. G., Vyngra A. V., Erofeev P., Novak B. P. Analysis of the starting characteristics of the complex maritime systems // Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019 (Gurugram, 06–07 September 2019). Publisher Elsevier B. V., 2020. P. 2164–2171.
11. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G. Automatic estimation of defects in composite structures as disturbances based on machine learning classifiers oriented mathematical models with uncertainties // Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2020. N. 3. P. 13–29.

References

1. Lantsosh K. *Variatsionnye printsipy mekhaniki* [Variational principles of mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1965. 408 p.
2. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: v 10 tomakh*. [Theoretical physics: in 10 volumes]. Moscow, Nauka Publ.; Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1986. T. 2. Teoriya polja. 736 p.

3. Neimark Iu. I., Fufaev N. A. *Dinamika negolonomnykh sistem* [Dynamics of nonholonomic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 519 p.
4. Chernyi S. G., Erofeev P. A., Dorovskoi V. A., Budnik V. Iu. *Razrabotka algoritmov identifikatsii obrazov signalov i ob"ektov na morskome transpore* [Developing algorithms for identifying images of signals and objects in maritime transport]. *Sudostroenie*, 2021, no. 1 (854), pp. 50-54.

5. Sokolov S. S., Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., Nyrkov A. P., Mamunts D. G. Dynamics models of synchronized piecewise linear discrete chaotic systems of high order. *Symmetry*, 2019, vol. 11, no. 2, p. 236.

6. Marsden J. E., West M. Discrete mechanics and variational integrators. *Acta Numerica*. Cambridge University Press, 2001. Pp. 357-514.

7. Chernyi S. G. Parametricheskaia identifikatsiia komponentov intellektual'nykh sistem na platforme sovremennykh mikrokontrollerov [Parametric identification of components of intelligent systems on platform of modern microcontrollers]. *Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Seriya 2: Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2021, no. 7, pp. 19-24.

8. Zhukov V. A., Butsanets A. A., Sherban S. A. Sredstva kontrolya energeticheskikh ustanovok sudov malogo vodoizmeshcheniia [Means of control of power plants of small displacement ships]. *Morskaiia radioelektronika*, 2020, no. 1 (71), pp. 26-29.

9. Vyngra A. V., Komissarov D. R., Chernyi S. G. Fizicheskoe modelirovanie avtomatizirovannoi sistemy upravleniia krenom sudna [Physical modeling of automated ship roll control system]. *Sistemy upravleniia i obrabotki informatsii*, 2020, no. 3 (50), pp. 40-49.

10. Chernyi S. G., Vyngra A. V., Erofeev P., Novak B. P. Analysis of the starting characteristics of the complex maritime systems. *Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019 (Gurugram, 06–07 September 2019)*. Publisher Elsevier B. V., 2020. Pp. 2164-2171.

11. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G. Automatic estimation of defects in composite structures as disturbances based on machine learning classifiers oriented mathematical models with uncertainties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2020, no. 3, pp. 13-29.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022; одобрена после рецензирования 11.03.2022; принята к публикации 31.03.2022
The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 11.03.2022; accepted for publication 31.03.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Алексеевич Доровской – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; esiap@mail.ru

Vladimir A. Dorovskoy – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; esiap@mail.ru

Владислав Александрович Кучеренко – аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; vlad.kucherenko1@mail.ru

Vladislav A. Kucherenko – Postgraduate Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; pavel.erofeev.95@mail.ru

Елена Геннадьевна Зинченко – магистрант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; eltel85@bk.ru

Elena G. Zinchenko – Master's Course Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; eltel85@bk.ru

Кирилл Сергеевич Чернобай – аспирант кафедры киберфизических систем; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; aspirantchernobai@gmail.com

Kirill S. Chernobai – Postgraduate Student of the Department of Cyberphysical System; Saint-Petersburg State Marine Technical University; aspirantchernobai@gmail.com

