



УДК 681.51

**МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ PI-РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ
ВРАЩЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНОГО ДВИЖИТЕЛЯ****Колмогорова Светлана Сергеевна,**

канд. техн. наук, доц., ss.kolmogorova@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», зав. каф., Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

Стариченков Алексей Леонидович,

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, alstarichenkov@etu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Шпекторов Андрей Григорьевич,

канд. техн. наук, доц., agshpectorov@etu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Гусев Данило Алексеевич,

магистр Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», danila.e00@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург,

Соловьёв Кирилл Дмитриевич,

магистр Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», roityl53@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург,

Аннотация

В статье представлено моделирование и настройка PI-регулятора частоты вращения для азимутального движителя судна ледового класса. Подход включает разработку математической модели двигательно-двигательного комплекса, параметрический синтез коэффициентов регулятора в среде MATLAB, реализацию алгоритма на программируемом логическом контроллере и последующую верификацию в ходе лабораторных испытаний. Особенностью подхода является учёт нелинейных характеристик гребного винта и адаптация регулятора к режиму Ice Mode, обеспечивающая согласованную работу с системой динамического позиционирования.

Ключевые слова: азимутальный движитель, PI-регулятор, математическое моделирование, ПЛК, динамическое позиционирование, ледовый класс.

**MODELING AND TUNING A PI ROTATIONAL SPEED CONTROLLER FOR
AN AZIMUTH THRUSTER****Kolmogorova Svetlana Sergeevna,**

Candidate of Technical Sciences, Assoc., ss.kolmogorova@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Head of the Department, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov

Starichenkov Alexey Leonidovich,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, alstarichenkov@etu.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

Shpektorov Andrey Grigorievich,

Candidate of Technical Sciences, Assoc., agshpektorov@etu.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

Gusev Danilo Alekseevich,

Master's degree from St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", danila.e00@gmail.com, Russia, Saint Petersburg,

Soloviev Kirill Dmitrievich,

Master's degree from St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", roityl53@gmail.com, Russia, Saint Petersburg,

ABSTRACT

The article presents the simulation and adjustment of a PI-speed controller for an azimuth propulsion system of an ice-class vessel. The approach includes the development of a mathematical model of the propulsion system, parametric synthesis of the regulator coefficients in the MATLAB environment, implementation of the algorithm on a programmable logic controller and subsequent verification during field tests. A special feature of the approach is the consideration of the nonlinear characteristics of the propeller and the adaptation of the regulator to the Ice Mode, which ensures consistent operation with the dynamic positioning system.

Keywords: azimuth thruster, PI controller, mathematical modeling, PLC, dynamic positioning, ice class.

Введение

Освоение Арктики и развитие Северного морского пути требуют применения судов с высокой ледопроеходимостью и современными системами автоматического управления. Важнейшим элементом таких судов являются азимутальные винто-рулевые колонки (ВРК) гондольного типа, сочетающие функции движителя и рулевого устройства. На судах снабжения, таких как SCF Sakhalin, установлены ВРК ABB Azipod VI16000 [1], оснащённые специальным режимом ограничения мощности (Ice Mode [2]), который защищает судовую электросеть от резких скачков нагрузки при контакте винта со льдом. Однако этот режим работает только в режиме поддержания мощности, тогда как система динамического позиционирования (СДП) формирует команды в виде задания оборотов. Данное рассогласование делает невозможным полноценное использование СДП в чистых водах и простых ледовых условиях без дополнительной адаптации [3].

Существующие подходы к синтезу регуляторов частоты вращения часто не учитывают специфику работы в ледовых условиях и кубическую зависимость мощности от оборотов, что приводит к снижению точности управления. Кроме того, реализация алгоритмов на промышленных контроллерах требует учёта дискретности времени и ограничений вычислительных ресурсов. В связи с этим актуальной является задача разработки подхода, который объединял бы математическое моделирование, параметрическую настройку и программную реализацию регулятора, обеспечивая его эффективную работу в реальных условиях эксплуатации.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка и апробация подхода моделирования и настройки ПИ-регулятора частоты вращения азимутального движителя, позволяющей согласовать команды системы динамического позиционирования с локальным управлением ВРК в режиме Ice Mode.

Теория

В качестве объекта исследования выбран двигательно-двигательный комплекс судна снабжения SCF Sakhalin, оснащённый двумя ВРК ABB Azipod VI16000. Характеристики движителя приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики ABB Azipod VI16000 [1]

Параметр	Значение
Модель	Azipod VI1600
Тип движителя	Полноповоротная ВРК гондольного типа тянущей компоновки
Номинальная мощность на валу, МВт	16
Тип электродвигателя	Высокомоментный асинхронный (АС)
Тип гребного винта	Фиксированного шага
Номинальная частота вращения, об/мин	215
Номинальный крутящий момент, кН·м	1025
Диаметр гребного винта, м	4,25
Масса гребного винта, кг	6500
Система управления	Преобразователь частоты с векторным управлением
Поддержание оборотов	-
Поддержание мощности	+

Подход включает следующие этапы:

Построение математической модели динамики вращения вала движителя. Основное дифференциальное уравнение имеет вид [4, 5]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot J_d} [M_{дв}(t) - M_p(t)], \quad (1)$$

где $M_{дв}(t)$ – это движущий момент электродвигателя, $M_p(t)$ – это момент сопротивления винта, а J_d – момент инерции вращающихся масс, приведённый к валу двигателя, n – частота вращения ВРК.

$$M_p(t) = \rho \cdot D^5 \cdot n^2 \cdot (t) \cdot K_q(t), \quad (2)$$

$$J_d = m_d \left(\frac{D}{2} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность воды, D – диаметр винта, V – скорость набегающего потока. Коэффициент K_q аппроксимируется полиномом третьей степени на основе типовых

кривых действия винта (рис. 1). Это позволяет учесть нелинейную связь между оборотами и моментом, что принципиально важно для корректного моделирования.

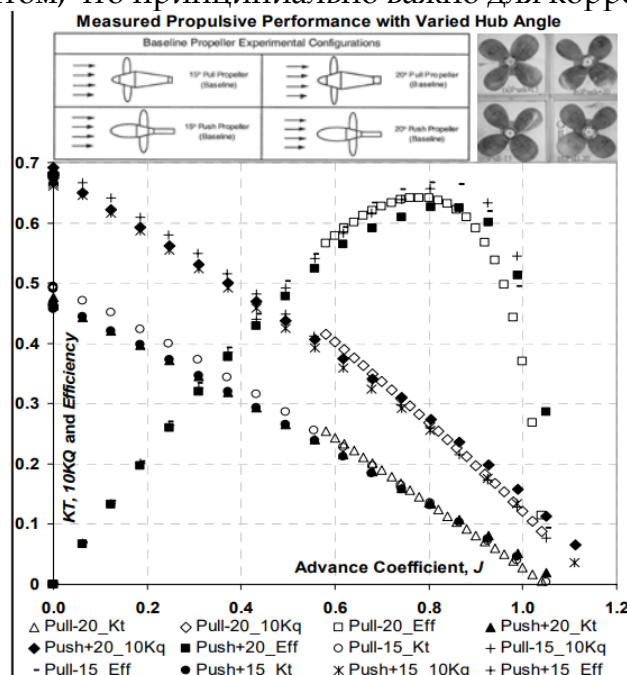


Рис. 1. Типовые кривые действия винта [6]

Синтез ПИ-регулятора в дискретной форме для реализации на ПЛК. Закон управления:

$$\Delta n_{reg}(t) = K_g(k_p \cdot \Delta n(t) + k_i \cdot \int_0^t \Delta n(t)dt), \quad (12)$$

где $\Delta n = n_{ref} - n$ – ошибка регулирования; K_g – общий коэффициент усиления; K_p и K_i – пропорциональный и интегральный коэффициенты.

Настройка коэффициентов производилась путём параметрического поиска в среде MATLAB, варьировались K_p от 0,01 до 0,1 и K_i от 0,0005 до 0,0015. Оптимальными признаны значения $K_p=0,07$, $K_i=0,001$, обеспечивающие перерегулирование не более 5% и время установления около 6 с.

Реализация регулятора на ПЛК Phoenix Contact AXC 3050. Программа написана на языке структурированного текста (ST). В состав алгоритма включены защитные механизмы: зона нечувствительности для подавления колебаний на малых отклонениях; ограничение интегральной суммы (anti-windup); сброс интегратора при резком изменении уставки или при превышении предельной ошибки;

кубическое нормирование выходного сигнала для согласования с мощностной характеристикой винта.

Верификация проводилась в ходе лабораторных испытаний на модели судна SCF Sakhalin. Регистрировались заданные и фактические обороты при ступенчатых изменениях уставки (от 60 до 150 об/мин) при различных значениях K_g .

Результаты моделирования

В ходе вычислительных экспериментов в MATLAB была подтверждена работоспособность регулятора с выбранными коэффициентами. На рис. 2 показан переходный процесс при отработке ступенчатого задания (уставка 90 об/мин). Видно, что система выходит на заданное значение с незначительным перерегулированием (около 5%) и временем установления около 6 с.

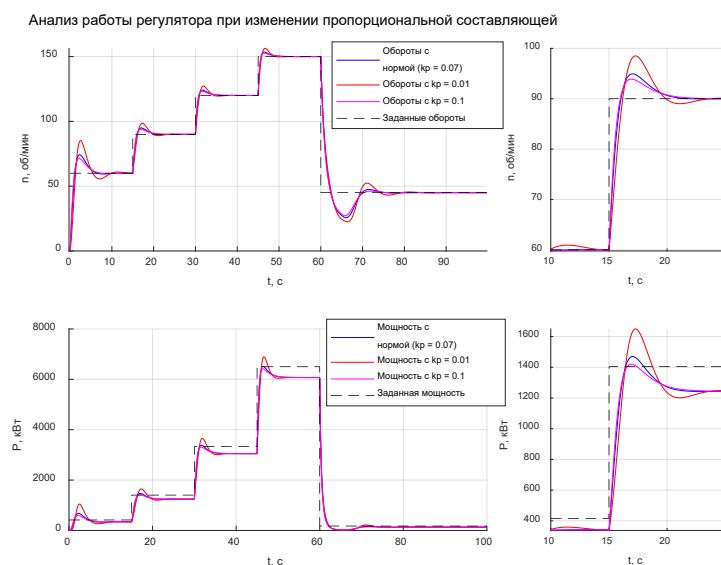


Рис. 2. Изменения оборотов и мощности ВРК при разных значениях пропорционального коэффициента регулятора

Лабораторные испытания на модели судна выявили, что при выключенном регуляторе фактические обороты значительно отстают от заданных из-за работы ВРК в режиме Ice Mode, ограничивающем мощность (рис. 3).

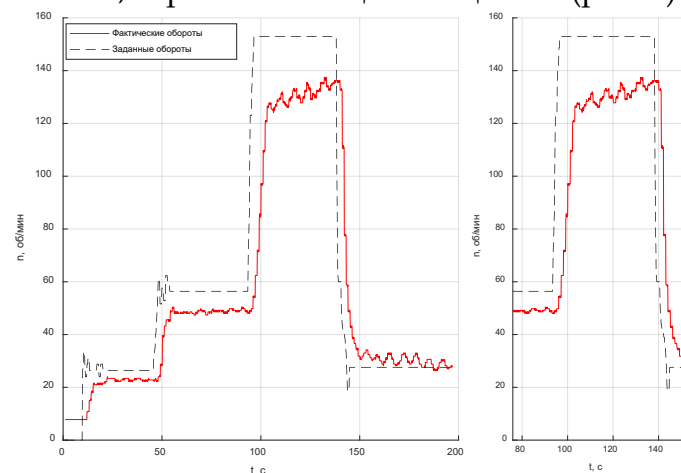


Рис. 3. Графики оборотов ВРК с выключенным регулятором

При включении регулятора система начинает уверенно отслеживать задания СДП (рис. 4). Наилучшее качество регулирования достигнуто при общем коэффициенте усиления $K_g=0,3$: переходные процессы плавные, без колебаний и с минимальной статической ошибкой.

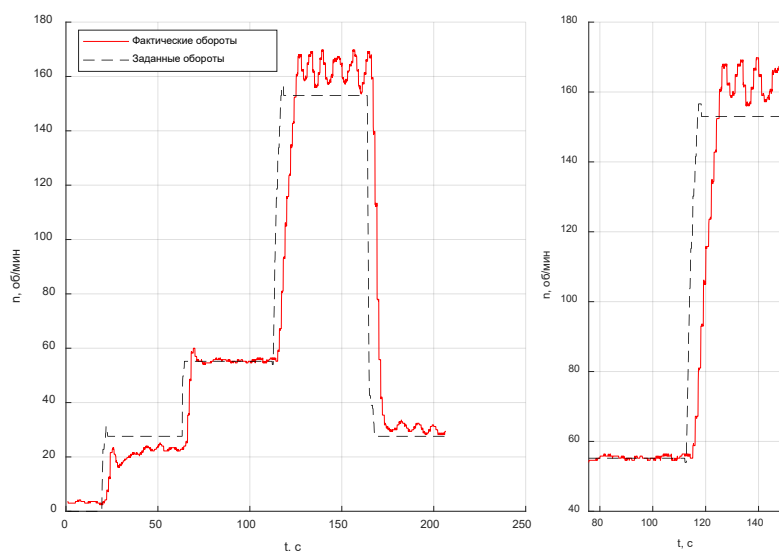


Рис. 4. Графики оборотов ВРК с включенным регулятором (КУ 0.3)

В ходе испытаний также исследовалось влияние коэффициента усиления K_g . При увеличении до 0,8 наблюдалось заметное перерегулирование и рывки упора, что негативно сказывается на механических элементах привода. При $K_g=0,1$ переходные процессы затягивались, и статическая ошибка не устранялась полностью. Таким образом, выбранное значение $K_g=0,3$ является оптимальным для данного типа судна и условий эксплуатации.

Предложенный подход отличается от классических подходов тем, что:

- учитывает нелинейность характеристики винта через аппроксимацию коэффициента момента, что повышает точность моделирования;

- включает адаптацию к специфическому режиму Ice Mode, что позволяет использовать регулятор в широком диапазоне ледовых условий;

- использует защитные алгоритмы, гарантирующие надёжную работу ПЛК в реальном времени.

Ограничениями подхода являются необходимость наличия точных данных о характеристиках винта (кривые K_q) и зависимость качества настройки от точности модели. Однако в условиях серийной поставки СДП для судов одного типа эти параметры могут быть унифицированы.

Заключение

Разработан и апробирован подход моделирования и настройки ПИ-регулятора частоты вращения азимутального движителя, которая включает:

- построение нелинейной математической модели двигательного-двигательного комплекса с аппроксимацией коэффициента момента;

- параметрический синтез регулятора в среде MATLAB с определением оптимальных коэффициентов $K_p=0,07$, $K_i=0,001$;

- программную реализацию на ПЛК Phoenix Contact с защитными механизмами;

- валидацию регулятора на модели судна SCF Sakhalin, подтвердившую эффективность регулятора при $K_g=0,3$.

Представленный в статье подход позволяет согласовать работу СДП с локальным управлением ВРК в режиме Ice Mode, что обеспечивает полноценное использование динамического позиционирования на судах ледового класса. Результаты работы могут быть внедрены в серийные поставки систем динамического позиционирования для судов с азимутальными движителями.

Список литературы:

1. SCF Sakhalin [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.wikipedia.org/?curid=15854853> (дата обращения 17.05.2024).
2. Системы Azipod® VI и ICE: обзор / ABB Oy, Marine & Ports. – Хельсинки: ABB Oy, 2019. – 12 с.
3. АО Навис. Системы динамического позиционирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://navis.spb.ru/katalog/sistemy-dinamicheskogo-pozicionirovaniya/> (дата обращения 26.05.2024).
4. Движительно-рулевые и подруливающие устройства. Документация. Требования к конструкции. Расчеты. Испытания: Р.013-2006 / Российский Речной Регистр. – Москва, 2006. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830222.htm> (дата обращения: 28.05.2026).
5. Антоненко, С. В. Судовые движители: учеб. пособие. – Дальневосточный государственный технический университет, 2007.
6. M. F. Islam, B. Veitch and P. Liu/ Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 4(2007) 57-71.
7. Стариченков, А. Л. Программно-алгоритмический комплекс автоматизированного управления установкой преобразователя дополнительной энергии в составе SCADA-системы / А. Л. Стариченков, С. С. Колмогорова, А. А. Ранцев // Приборы. – 2025. – № 9(303). – С. 19-27. – EDN MTUWVG.
8. Hänninen S. Azimuth Propeller Operation in Ice Conditions / S. Hänninen, T. Heideman, K. Vänskä // ICETECH 2012: Proceedings of the International Conference on Ships and Marine Structures in Ice Conditions, Banff, Canada, 2012. – Paper No. ICETECH12-104-RF. – [Электронный ресурс]. – URL: https://library.e.abb.com/public/3031a3b0569d179b85257acb00622abb/ICETECH12-104-RF-Hanninen,et_al.pdf (дата обращения: 14.06.2026).

References:

1. SCF Sakhalin [Electronic resource]. – URL: <https://en.wikipedia.org/?curid=15854853> (accessed 17.05.2024).
2. Azipod® VI and ICE systems: an overview / ABB Oy, Marine & Ports. Helsinki: ABB Oy, 2019. – 12 p.
3. AO is Overhanging. Dynamic positioning systems [Electronic resource]. – URL: <https://navis.spb.ru/katalog/sistemy-dinamicheskogo-pozicionirovaniya/> / (accessed 05/26/2024).
4. Propulsion, steering and thrusters. Documentation. Design requirements. Calculations. Tests: p.013-2006 / Russian River Register. Moscow, 2006. [Electronic resource]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293830/4293830222.htm> (date of reference: 05/28/2026).
5. Antonenko, S. V. Ship propulsion systems: textbook. stipend. – Far Eastern State Technical University, 2007.

6. M. F. Islam, B. Veitch and P. Liu/ Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 4(2007) 57-71.
7. Starichenkov, A. L. Software and algorithmic complex for automated control of the installation of an additional energy converter as part of a SCADA system / A. L. Starichenkov, S. S. Kolmogorova, A. A. Rantsev // Devices. – 2025. – № 9(303). – Pp. 19-27. – EDN MTUWVG.
8. Hänninen S. Azimuth Propeller Operation in Ice Conditions / S. Hänninen, T. Heideman, K. Vänskä // ICETECH 2012: Proceedings of the International Conference on Ships and Marine Structures in Ice Conditions, Banff, Canada, 2012. – Paper No. ICETECH12-104-RF. – [Electronic resource]. – URL: https://library.e.abb.com/public/3031a3b0569d179b85257acb00622abb/ICETECH12-104-RF-Hanninen,et_al.pdf (accessed: 06/14/2026).