

УДК 629.12

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АНАЛИЗА РАБОТЫ СУДОВОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ВНУТРЕННИМ ВОДНЫМ ПУТЯМ

Васильев С.А., Зеленев С.Н., Ребрушкин М.Н.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: nntu@nntu.ru

Настоящая статья посвящена вопросу применения комплексной теории переходных процессов для анализа и выбора оптимальных, экономически и технически выгодных режимов работы главных двигателей судов внутреннего плавания в зависимости от постоянно изменяющихся сложных путевых, гидрометеорологических и экономических условий эксплуатации. Данная практическая задача решается на основе анализа современных методов судовождения и базируется на теории работы судового пропульсивного комплекса (ПК) «корпус – движитель – двигатель – средства управления». Комплексная теория позволяет достоверно оценить работу всех перечисленных элементов в их взаимосвязях, учитывать внешние путевые и гидрометеорологические условия, в нее легко могут быть введены планируемые и фактические технико-экономические показатели и условия конкретного рейса. Данная теоретическая модель эксплуатации судна позволяет в любой момент времени поменять исходные и назначить наиболее целесообразные режимы работы судового движительно-рулевого комплекса (ДРК). Следует также отметить, что теория переходных процессов судового ПК может быть применена для выбора наиболее эффективного ДРК судна ещё на этапе его проектирования.

Ключевые слова: судовый пропульсивный комплекс, главные двигатели, режимы работы, теория переходных процессов, система управления, измерение, контроль и учет расхода топлива

APPLICATION OF THEORY OF TRANSIENT PROCESSES FOR THE ANALYSIS OF THE WORK OF SHIP PROPULSIVE COMPLEX DURING THE MOTION ALONG THE INLAND WATERWAYS

Vasilev S.A., Zelenov S.N., Rebrushkin M.N.

Nizhni-Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhni Novgorod, e-mail: nntu@nntu.ru

Present article is dedicated to a question of the application of complex theory of transient processes for analysis and selection of the optimum, economically and technically advantageous regimes of the work of the main engines of the vessels of inland navigation depending on the constantly changing complex travelling, hydrometeorological and economic operating conditions. This practical problem is solved on the basis of the analysis of the contemporary methods of pilotage and is based on the theory of the work of ship propulsive complex (PC) "ship's hull – propeller – the engine – of means of control". Complex theory makes it possible to reliably estimate the work of all enumerated elements in their interrelations, to consider external travelling and hydrometeorological conditions, the planned and actual technical and economic indices and the conditions of concrete voyage easily can be introduced into it. This theoretical model of the operation of vessel makes it possible at any moment of time to change initial and to appoint the most expedient modes of operation of ships propeller- steering complex (PSC). It should also be noted that the theory of the transient processes of ship PC can be used for the selection of most effective PSC of vessel still in the stage of its design.

Keywords: ship propulsive complex, main engines, the operating modes, the theory of transient processes, control system, measurement, control and the calculation of the fuel consumption

Движение судна по акватории внутренних водных путей связано с постоянным удерживанием судна на судовом ходу, т.е. выполнением различных маневров. Действительно, даже на прямом курсе судоводителю необходимо учитывать силу и направление ветра, переменные глубины фарватера, условия расхождения со встречными и попутными судами. Наличие ветра всегда вызывает появление ветрового дрейфа, что требует выбора направления движения судна с некоторым углом к направлению дрейфа для компенсации ветрового сноса. Соответственно, движение судна по криволинейным траекториям связано с вы-

полнением частичных циркуляций разного направления и кривизны траектории.

Материалы и методы исследования

На практике управление судном обеспечивается судовым комплексом «двигатели – движители – средства управления (рули или поворотные насадки)». Поскольку путевые и гидрометеорологические условия на внутренних водных путях постоянно изменяются, то, соответственно, требуется и изменение режимов работы движительно-рулевого комплекса ДРК, который в любой момент времени должен обеспечивать необходимые углы дрейфа и радиусы циркуляций, поддерживающие положение судна на судовом ходу.

При эксплуатации необходимо учитывать также и особенности совершаемых рейсов, к которым относятся: различную загрузку, свойства груза и срочность

его доставки, разнообразные ветроволновые условия по пути следования, особенности фарватера (наличие глубоководных и мелководных участков, извилистость речного русла) и т.д.

Рассматривая любую из перечисленных особенностей рейса, необходимо отметить, что все они при любом сочетании также сильно сказываются на технико-экономических показателях работы судна в каждом конкретном рейсе.

Задачи выбора рациональных режимов работы судна и его ДРК в настоящее время возлагаются непосредственно на судоводителей, которые действуют только на основе своего уровня подготовки, накопленного практического опыта, оценки внешних воздействий, учета ходовых качеств конкретного судна, особенностей работы его энергетической установки и многих других обстоятельств. Естественно, что такое «ручное управление» не может быть всегда оптимальным, поэтому при эксплуатации часто допускаются разнообразные ошибки вплоть до возникновения аварийных ситуаций, особенно в сложных погодных условиях и большой загрузке судового хода. Вместе с тем в настоящее время имеется теоретическое обоснование и уже созданы технические устройства, способные автоматически надежно и экономически целесообразно выбирать режимы работы судового ДРК каждого конкретного судна в реальных условиях эксплуатации.

Среди различных теоретических подходов, прежде всего, следует отметить комплексную теорию переходных процессов судового комплекса «корпус судна – главные двигатели – судовые движители – средства управления» – пропульсивного комплекса (ПК), позволяющую наиболее полно описывать работу конкретного судна в действующих условиях его эксплуатации в данном рейсе [1]. В этой теории достоверно оценивается работа всех перечисленных элементов в их взаимосвязях, учитываются внешние путевые и гидрометеорологические условия, в нее могут быть введены планируемые технико-экономические показатели конкретного рейса. Данная теоретическая модель позволяет в любой момент времени поменять исходные и назначить наиболее целесообразные режимы работы судового ДРК при действующих внешних условиях.

Следует также отметить, что теория переходных процессов судового ПК может быть эффективно применена для выбора наиболее эффективного ДРК судна ещё на этапе его проектирования. Так, одной из основных задач проектирования судна является обоснованный выбор типа ДРК и его основных характеристик при движении на прямом курсе. В основе ее решения лежит совместное удовлетворение требований ходкости и норм управляемости.

Признанным критерием эффективности судового ПК с точки зрения ходкости судна является его пропульсивный КПД [1], значение которого зависит от многих факторов, а именно:

- 1) от технического совершенства энергетической установки судна и валопровода, характеризуемых величинами механического КПД двигателя, КПД валопровода, редуктора, гидро- или электропередачи;
- 2) от характеристик взаимодействия гребного винта и корпуса судна с учетом неравномерности работы винта, коэффициента влияния корпуса судна;
- 3) от КПД судового движителя.

Первые две группы факторов зависят от правильного выбора типа энергетической установки и элементов передачи энергии от двигателя на гребной винт, а также от продуманного проектирования формы кормовой оконечности корпуса судна, выступающих частей и правильного размещения ДРК относительно корпуса судна с учетом их взаимодействия. Решающее значение в оценке эффективности судового ДРК принадлежит КПД движителя, который, в свою очередь, существенно зависит от степени его нагруженности, характеризуемой коэффициентом нагрузки движителя по упору [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка методами теории переходных процессов существующих диаграмм для расчета открытых гребных винтов и винтов в насадках позволила наметить возможные пределы изменения КПД движителя для реальных сочетаний характеристик различных движителей [1]. Установлено, что в диапазоне изменения коэффициента нагрузки движителя по упору от 0 до 0,7 КПД открытого винта больше КПД комплекса «винт – насадка», от 0,7 до 2,0 они соизмеримы, а при значениях больше 2,0 КПД открытого винта всегда меньше КПД комплекса «винт – насадка».

Таким образом, вопрос о выборе наиболее эффективного ДРК для каждого конкретного проекта сводится к расчету коэффициента нагрузки по упору и выбору соответствующего типа ДРК по имеющейся диаграмме эффективности.

Известно, что в большинстве случаев определение мощности энергетической установки водоизмещающих судов внутреннего плавания проводится с тех же позиций, что и для морских судов, т.е. из условия минимального волнового сопротивления и достижения расчетной скорости в условиях глубокой воды. Однако условия движения судна по внутренним водным путям характеризуются прохождением в подавляющем большинстве мелководных участков, где особенности возникновения сопротивления движению судна существенно отличаются от условий глубокой воды. Понятно, что и назначение номинальных ходовых скоростей также должно производиться с учетом этих условий. На практике это требование не выполняется и поэтому в настоящее время большинство грузовых судов внутреннего плавания в целях повышения экономической эффективности эксплуатируются со скоростями движения меньшими, чем номинальные.

Комплексная теория переходных процессов дает возможность определения целесообразных усредненных скоростей движения судов в реальных рейсах, причем при различной их загрузке. По полученным расчетным методикам определение этих скоростей может быть проведено не только в технических службах судовладельца, но и силами плавсостава каждого конкретного судна непосредственно перед рейсом.

Рассмотрение частных случаев движения судна приводит к выводу, что в реальных случаях движения практически постоянно должно происходить изменение частоты вращения главных двигателей. Для поддержания частоты вращения главных двигателей используются всережимные и предельные регуляторы. Однако, имея целью лишь поддержание заданной частоты вращения двигателей и уменьшение пульсаций упора винта, наличие регуляторов ещё не обеспечивает экономичной работы энергетической установки и судна в целом. Одновременно становится понятным, что заданный режим движения судна обеспечивается не только работой двигателей. В этом непосредственно участвуют все средства управления движением судна, от их работы также изменяется баланс сил, действующих на корпус, и, следовательно, режим работы двигателей. Таким образом, для обеспечения рациональных режимов работы двигателей необходимо изучение всего судового ПК на основе теории переходных процессов. По результатам такого исследования можно в любой момент времени назначить обоснованно целесообразный режим работы ДРК конкретного судна, появляется возможность разработки алгоритма нахождения рационального режима работы данного судового комплекса в конкретных условиях.

Естественно, что при управлении судном в рейсе судоводитель не имеет возможности постоянного вычисления и установки заданных режимов, поэтому существует реальная необходимость автоматизировать проведение вычислений и задания расчетных режимов работы ПК автоматизированным устройством – судовым управляющим комплексом. Такой комплекс должен полностью учитывать в течение рейса как постоянные (вид груза, загрузку и посадку судна, экономические показатели и т.п.), так и переменные (глубина и извилистость фарватера, течение, скорость и направление ветра и т.д.) параметры работы судна и поддерживать их при условии достижения наи-

большей экономической эффективности и безопасности эксплуатации судна.

Таким требованиям отвечают существующий судовой электронный управляющий комплекс (СЭУК) и в особенности модернизированный судовой электронный управляющий комплекс (СЭУК-М) [5]. Они разработаны для определения таких режимов работы главных двигателей реального судна, при которых прибыль за рейс является максимальной при минимизации эксплуатационных затрат, особенно в отношении расхода топлива главными двигателями при постоянно изменяющихся условиях реального рейса. Основной особенностью этих комплексов является то, что их работа не ограничивается только определением подобных режимов, но также одновременно происходит текущее автоматическое управление главными двигателями судна с целью постоянного поддержания расчетных рациональных режимов.

Первоначально разработанный СЭУК состоит из двух основных блоков: – вычислительного комплекса (ВК) и электронного регулятора оптимальных режимов работы главных двигателей (ЭРД). Ядром ВК является установленный на судне персональный компьютер, для которого на основе комплексной теории переходных процессов судового комплекса специально разработано оригинальное программное обеспечение. ЭРД создан на электронно-механическом принципе [3, 5]. В него включены электронный блок регулирования, датчики положения элементов управления главными двигателями, а также исполнительные механизмы, подключенные к штатной судовой системе дистанционного управления главными двигателями.

ЭРД перед рейсом настраивается по параметрам, рассчитанным вычислительным комплексом и далее работает автономно, постоянно и автоматически учитывая изменение условий движения судна в реальном рейсе [3]. Вместе с тем при необходимости, например возникновении резерва времени в ожидании шлюзования или подхода к причалам, возможна простая корректировка режимов работы по поправкам, рассчитанным ВК.

Принципиальные решения, положенные в основу работы СЭУК, а также элементы его конструкции прошли проверку и надлежащую доработку на опытных образцах в процессе проведения его натурных испытаний, проведенных на грузовых судах в условиях реальных рейсов в течение

нескольких навигаций [3]. Доработанный вариант СЭУК был внедрен на малой серии грузовых судов типа «Волго-Дон» (5 единиц) с целью проведения пробной эксплуатации в течение реальных навигаций [4]. Пробная эксплуатация и проведенные сравнительные натурные испытания показали достаточные простоту использования и надежность работы СЭУК, а также весьма высокую экономическую эффективность их применения. Показательно, что на сложных участках пути экономия топлива превышала 23%, а средние ориентировочные показатели экономии ГСМ за навигацию оказались не менее 8% [4].

Был отмечен большой интерес судоводителей-практиков к устройству и применению СЭУК, получены хорошие отзывы об их работе. Однако они еще не в полной мере освоились с проведением вычислений на ЭВМ. Однако при эксплуатации малой серии не был налажен постоянный контроль правильности использования СЭУК. Поэтому хотя и имеются положительные результаты по итогам навигации, но они несколько меньше ожидаемых расчетных величин.

Анализ опыта, полученного при пробной эксплуатации СЭУК на теплоходах типа «Волго-Дон» [4], показал, что заниженные показатели эффективности применения СЭУК в основном объясняются тем, что его работа оказалась почти не защищенной от влияния человеческого фактора.

Во-первых, конструктивной особенностью СЭУК является разделение работы вычислительного комплекса (ВК) и электронного регулятора движения (ЭРД). При этом настройка электронного регулятора осуществляется непосредственно судоводителем вручную. Естественно, качество настройки зависит непосредственно от квалификации и личной ответственности настраивающего. Выявлены случаи настройки ЭРД не по параметрам, рассчитанным ВК, а по собственным соображениям капитана, что приводило к работе СЭУК на режимах, далеких от оптимальных.

Во-вторых, в конструкции СЭУК не заложен постоянный контроль правильности его применения. Поэтому те судоводители, которые не осознают заинтересованности в экономии эксплуатационных расходов, в частности экономии топлива, зачастую работают на нерациональных режимах или же вообще отключают СЭУК по субъективным соображениям.

В-третьих, работа ЭРД связана с постоянной оценкой расхода топлива каждым из

главных двигателей. Вместе с тем эта информация содержится в структурной схеме в неявном виде, хотя сведения о мгновенном и суммарном расходе топлива в доступном виде весьма полезны для качественной работы судоводителя и, естественно, для судовладельца.

Дополнительно существенным недостатком СЭУК явилось то, что программа, заложенная в него, предназначена только для грузовых теплоходов типа «Волго-Дон». Она построена по «жесткому» принципу и не может быть без существенных переделок использована на теплоходах с иными пропульсивными комплексами.

Таким образом, пробная эксплуатация СЭУК в реальных навигационных условиях показала необходимость развития его принципиальной структуры и конструктивных решений в направлении:

- осуществление настройки СЭУК на расчетные параметры непосредственно при автоматизированном использовании возможностей вычислительного комплекса;

- реализация постоянной фиксации времени и режимов работы СЭУК с автоматической записью в запоминающем устройстве (ведение электронного журнала работы СЭУК);

- представление информации о мгновенном и суммарном расходе топлива главными двигателями в явном виде на экране персонального компьютера с автоматической регистрацией в электронном журнале;

Внедрение обновленных принципов построения программного обеспечения ВК, позволяющих использовать его для разных судов с различными пропульсивными комплексами.

Эти обстоятельства были учтены в последующей работе, в результате которой был создан новый, более совершенный вариант судового электронного управляющего комплекса – СЭУК-М (СЭУК модернизированный) [5].

Основной его особенностью явилось объединение в единое взаимосвязанное целое ВК и ЭРД. Вторая существенная особенность – разработка обновленного программного обеспечения, более полно использующего возможности теории переходных процессов судового пропульсивного комплекса. В СЭУК-М в его память перед рейсом вводятся только постоянные данные будущего рейса, а изменяющиеся условия учитываются постоянно работающим в течение движения судна в рейсе вычислительным комплексом. Изменение

режимов работы системы «двигатель – движитель», а также сопровождающие параметры постоянно отражаются на экране дисплея. Вместе с тем реализован диалоговый режим взаимодействия судоводителя с программным обеспечением СЭУК-М, позволяющий в любой момент времени получить информацию о работе комплекса и вводить необходимые корректировки.

Следует заметить, что одновременно помимо выполнения основных задач СЭУК-М позволяет осуществить и другие дополнительные, сервисные возможности. Дополняя программное обеспечение соответствующими программами, можно выполнять расчеты погрузки и разгрузки судна, определения и обеспечения режимов движения при заданном времени подхода к шлюзам и портам, автоматизированный учет расхода топлива, проведение бухгалтерского учета, затраты на «колпит» и многое другое.

Заключение

Таким образом, выполненная работа показала, что теория переходных процессов судового ПК обладает реальными возможностями успешного применения ее как при проектировании и выборе наиболее эффективного ДРК каждого конкретного проекта и модернизации существующих,

так и при разрешении сложных эксплуатационных задач и даже создания автоматизированных судовых электронных управляющих комплексов.

Естественно, что теория переходных процессов судового пропульсивного комплекса, помимо описанных выше примеров, может быть с успехом применена и для решения других, зачастую весьма своеобразных задач, таких как расчеты рациональных приемов проведения привально-отвальных операций в разнообразных гидрометеорологических условиях, безопасное маневрирование при прохождении участков акваторий со сложными путевыми обстоятельствами и т.п.

Список литературы

1. Васильев А.В. Управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
2. Брук М.А., Рихтер А.А. Режимы работы судовых дизелей. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 484 с.
3. Васильев А.В. Фундаментальные исследования эффективности судового электронного управляющего комплекса. В 3 т. Т. 1 / А.В. Васильев, Г.И. Беззубов, А.Б. Ваганов и др. – Н. Новгород: НГТУ, 1994. – 94 с.
4. Васильев А.В. Фундаментальные исследования эффективности судового электронного управляющего комплекса. В 3 т. Т. 3 / А.В. Васильев, Г.И. Беззубов, А.Б. Ваганов и др. – Н. Новгород: Тр. НГТУ, 1995. – 107 с.
5. Васильев С.А., Зеленов С.Н., Ребрушкин М.Н. Автоматизированный комплекс оптимизации работы судовых дизелей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2013. – № 1. – С. 95–102.