

Компьютеризация оптимальных режимов электроэнергетических установок судов

✓
62.1.3

Д-р техн. наук, проф. В.С. Богомолов; Е.В. Афанасьева – Калининградский государственный технический университет

В статье освещается разработка методологии построения системы безвахтенного обслуживания электроэнергетических установок судов на основе компьютерного управления.

В ходе научной работы были поставлены следующие задачи:

1. Анализ опыта эксплуатации электроэнергетических установок и систем автоматического управления электрическими параметрами судов;
2. Выбор метода оптимизации режимов электроэнергетических, в частности, валогенераторных, установок судов;
3. Структурное математическое моделирование процессов в электроэнергетических системах;
4. Натурное исследование режимов в электроэнергетических установках (ЭЭУ) с действующими и синтезированными регуляторами электрических параметров;
5. Разработка методики построения системы безвахтенного обслуживания ЭЭУ судов.

Объектом исследования являются электроэнергетические вало- и дизель-генераторные установки (ВГУ и ДГУ) промысловых и научно-исследовательских судов, а также пограничных судов и кораблей Балтийского флота.

Использовались следующие методы исследования: метод асатиической последовательной коррекции; метод гармонической линеаризации; теория систем подчиненного регулирования и управления; метод структурного математического моделирования; метод натурального исследования.

Тема научного исследования актуальна. На кораблях и судах не реализуются оптимальный по расходу топлива режим машинодвижительного комплекса (МДК), параллельная работа вало- и дизель-генераторов (ВГ и ДГ). Внедрение указанных режимов приводит к значительной экономии топлива, повышению коэффициента полезного действия установок, надежности функционирования систем, ремонтпригодности. На большинстве кораблей и судов не внедрен режим безвахтенного обслуживания. Внедрение этого режима также ведет к повышению надежности работы и – в целом – к повышению эффективности эксплуатации судов. Все перечисленные факторы соответствуют мировым тенденциям развития флота, приводят к объединению судовых должностей, сокращению численности экипажей, развитию сервисного обслуживания, повышению надежности функционирования ЭЭУ.

Анализ опыта эксплуатации электроэнергетических установок кораблей и их электрических параметров показывает, что на пограничных кораблях типа «Гриф-М» наблюдаются провалы напряжения при пуске мощных потребителей электроэнергии, которые составляют до 70 % от номинальной величины напряжения, что заставляет в этих случаях отключать часть потребителей. На спасательном буксире Балтийского флота – типа «СБ-921» – имеются автоколебательные режимы напряжения с большой амплитудой, что в неблагоприятных условиях приводит к появлению неустойчивого режима и отключению установки ап-



паратами защиты. Такие же недостатки характерны для ряда промысловых судов. Это ограничивает область использования валогенераторных установок, снижает уровень технической эксплуатации флота.

Для инженерного исследования режимов ЭЭУ использовался метод гармонической линеаризации с применением нормированных логарифмических характеристик типовых нелинейных элементов. Для углубленного исследования были проведены натурные испытания в ходовом режиме валогенераторных установок указанных судов, а также научно-исследовательского судна «Академик Иоффе», где результаты исследования определялись с помощью компьютера.

Причиной указанных недостатков является тот факт, что в качестве регуляторов напряжения применяются регуляторы, действующие по отклонению, либо комбинированные. Эти регуляторы являются пропорциональными (П) регуляторами. Они действуют только вдоль вертикальной оси – оси напряжения, но не контролируют и не регулируют время переходного процесса – вдоль горизонтальной оси времени.

Эффективность функционирования ЭЭУ с П-регуляторами напряжения, определенная на основании комплексного критерия эффективности, оказывается низкой и составляет 0,26 относительных единиц.

Валогенераторные установки представляют собой автоматическую систему подчиненного управления (СПУ). Особенность ее состоит в том, что связь между регуляторами напряжения и регуляторами скорости вращения осуществляется не по управ-

лению, а по нагрузке, т.е. через объект управления – внутреннюю обратную связь по скорости вращения валогенератора.

Для синтеза оптимального регулятора напряжения применен метод астатической последовательной коррекции. Его суть состоит в том, что производится компенсация больших постоянных времени объекта управления, в знаменатель передаточной функции регулятора вводится символ интегрирования для обеспечения астатического характера регулирования. Компенсация малых постоянных времени нецелесообразна, поскольку она приводит к неоправданному усложнению системы и даже к ее неработоспособности.

Компенсируется электромагнитная постоянная времени валогенератора, что приводит к пропорционально-интегральному (ПИ) регулятору напряжения.

В качестве критерия оптимальности выбран технический (модульный) оптимум, устанавливающий оптимальное соотношение между величиной перерегулирования входного процесса и временем регулирования. Применение ПИ-регулятора напряжения приводит к улучшению качества переходного напряжения. В стационарных режимах применение ПИ-регулятора напряжения приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний либо к полному их устранению. При этом снижается коэффициент усиления регулятора напряжения, что, однако, не приводит к некоторому снижению статической точности регулирования, поскольку ПИ-регулятор имеет астатический характер регулирования.

Рассчитаны параметры пропорционально-интегрального регулятора напряжения. Синтезированный пропорционально-интегральный регулятор напряжения был применен на ряде судов для обеспечения оптимального по расходу топлива режима МДК судна, что позволило получить значительную экономию дизельного топлива (*Богомолов В.С. Судовые электротехнологические установки подчиненного управления. Калининград: Книжн. изд-во, 1996. 240 с.*).

В оптимальном по расходу топлива режиме МДК снижается (ориентировочно на 15 %) скорость вращения главного двигателя, за счет чего достигается экономия топлива, при этом увеличивается угол разворота винта регулируемого шага (ВРШ) на 3–4° для сохранения прежнего хода судна. В этом режиме могут изменяться параметры качества переходных процессов валогенераторов, а применение ПИ-регулятора напряжения обеспечивает их соответствие требованиям Морского Регистра судоходства РФ.

Применение ПИ-регулятора напряжения позволило осуществить параллельную работу ВГ и ДГ, которая ранее не использовалась на судах. Здесь ПИ-регулятор обеспечивает постоянство времени регулирования напряжения на обоих ВГ для повышения устойчивости параллельной работы. Синхронизация обоих агрегатов по частоте при этом обеспечивается за счет датчиков скорости вращения агрегатов – при появлении рассогласования величин сигнал с сумматора поступает на серводвигатель, который изменяет положение рейки топливного насоса дизеля и, соответственно, подачу топлива, что ведет к выравниванию скоростей вращения агрегатов (*Богомолов В.С., Панкратов С.А. Новый способ параллельной работы вало- и дизель-генераторов// Эл. оборудование судов и эл.-энергетика. Сб. науч. тр. Калининград: КГТУ, 2001. С. 41–48.*)

Пропорционально-интегральный регулятор можно реализовать в виде корректирующего звена ПИ-типа, включаемого в обратную связь по напряжению валогенератора. Такая реализация не ведет к коренной модернизации действующей схемы управления, поэтому дешева, несложна, малогабаритна. Корректирующее звено включает в свой состав резисторы и конденсаторы.

Существуют три пути построения корректирующих звеньев: при использовании элементов дискретной электроники; средств микроэлектроники; микропроцессорных средств.

Корректирующее звено реализуется с помощью персонального компьютера, где оно включено в систему уравнений валогенераторной установки. Математическая модель задает оптимальный режим работы ВГУ. При необходимости корректировки переходных процессов напряжения в системе изменяются параметры постоянных времени корректирующего звена, что передается в виде команды и через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) поступает на валогенератор. При этом соблюдается оптимальный режим функционирования валогенератора при автономной и параллельной работе.

Производится математическое моделирование процессов в ВГУ судна при автономной и параллельной работе ВГ и ДГ. Составлена система дифференциальных уравнений судовой электротехнологической установки, включающая уравнения синхронного генератора; уравнения регулятора напряжения и корректирующего звена; уравнения асинхронной и статической нагрузки; уравнения связи токов и напряжения; уравнения машинодвигательного (пропульсивного) комплекса судна и уравнения привода ДГ (*Баранов А.П., Раимов М.М. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации// СПб: Элмор, 1997. С. 232*). Рассчитаны коэффициенты уравнений, составлен алгоритм вычислений. Использовались коэффициенты уравнений для синхронных генераторов российского производства типа МСК, немецкого производства типа DGFS, а также коэффициенты уравнений для синхронных генераторов финского производства типа HSPUL.

Составлена математическая модель в системе *Mathcad-2001* для ВГУ; получены результаты математического моделирования (*Богомолов, 1996*).

Результаты структурного моделирования показывают возможность функционирования ВГ и ДГ при автономной и параллельной работе в оптимальном режиме, что обеспечивается корректирующим звеном ПИ-типа.

Однако для структурного моделирования всей ВГУ целесообразно использовать систему *Matlab*. Разработана математическая модель (*рис. 1*), получены результаты моделирования, близкие к тем же в системе *Mathcad* для оптимальных режимов (*рис. 2, 3, 4*).

Разработана методика обеспечения безвахтенного обслуживания судовой ЭЭУ на примере рассмотренных оптимальных режимов функционирования ВГУ, включающая вопросы анализа и синтеза СПУ, структурного моделирования и реализации в реальных условиях эксплуатации (*Богомолов В.С., Афанасьева Е.В. Микропроцессорное управление режимами судовых электротехнологических установок// Материалы междунар. науч. конф. «Инновации в науке и образовании». «Известия КГТУ». Калининград, 2003. С. 105–109*).

Натурные исследования оптимальных режимов ВГ и ДГ проводились в режиме безвахтенного обслуживания при работе НИС «Академик Иоффе» в акватории Северной Атлантики в июне-июле 2005 г., а также в стояночном режиме при нахождении судна в порту Калининград.

Фирма – изготовитель электрооборудования: А/О «Кюми-Стрёмберг». Основные данные судовой электростанции: ДГ 1,2, тип *HSPTL 500RD3*, 1180 кВА, 1703 А, 400 В; ВГ 1,2, тип *HSPTL 500 RD2*, 2000 кВА, 2887 А, 400 В.

Для натурных исследований использовался персональный компьютер типа *IBM* уровня Пентиум-4, установленный в ЦПУ судна. К нему присоединялась приставка ЦАП – АЦП (аналогово-цифровой преобразователь) – через *PC*-входы

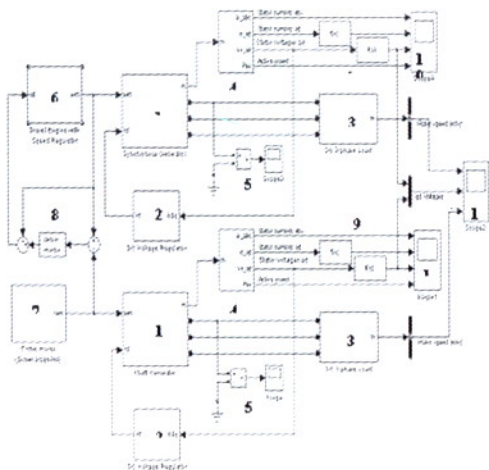


Рис. 1. Структурная математическая модель валогенераторной установки: 1 – регулятор скорости вращения ДГ; 2 – серводвигатель; 3 – регулятор скорости вращения ВГ; 4 – дизель-генератор; 5 – регулятор напряжения ДГ; 6 – валогенератор; 7 – регулятор напряжения ВГ; 8 – судовая сеть; 9 – электродвигатели; 10 – измерители электрических параметров

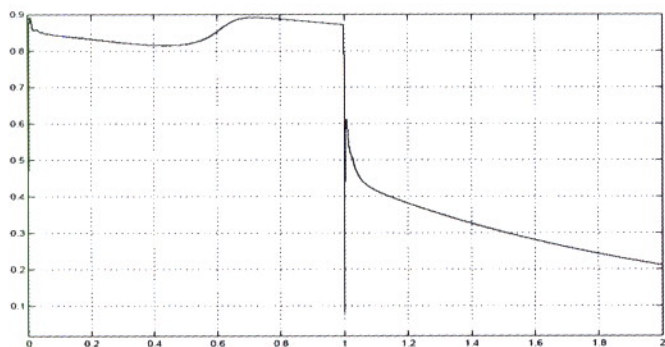


Рис. 2. Характеристика напряжения на валогенераторе при неравномерной скорости вращения гребного вала и отключенном регуляторе напряжения

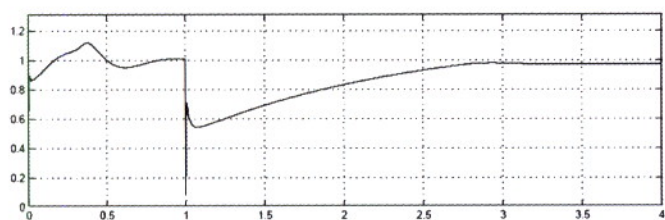


Рис. 3. Характеристика напряжения на валогенераторе при неравномерной скорости вращения гребного вала и включенном регуляторе напряжения

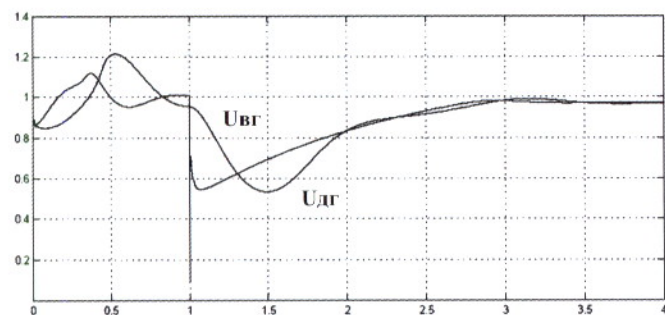


Рис. 4. Характеристики переходного процесса напряжения у валогенератора и дизель-генератора (U_{вг} – напряжение на валогенераторе; U_{дг} – напряжение на дизель-генераторе)

компьютера для связи с объектом в режиме безвахтенного обслуживания.

При необходимости коррекции процессов в СЭУ от компьютера через ЦАП поступали команды к объекту (главный двигатель, ВГ, ДГ, регуляторы напряжения). В процессе натурального эксперимента были определены точки в электросхемах для подключения ЦАП (добавочные сопротивления, шунты вольтметров и амперметров, обмотки схем управления). В компьютер была введена программа оптимального функционирования ВГУ.

Режим оптимального функционирования при параллельной работе ВГ и ДГ поддерживался в течение 4 сут. на переходе судна, а также в течение 3 сут. на переходах между точками океанографических исследований. При этом ВГ и ДГ работали параллельно.

Результаты натурных исследований главного двигателя (ГД) типа «Пилстик» НИС «Академик Иоффе» в ходовом режиме при уменьшении скорости вращения ГД в оптимальном по расходу топлива режиме следующие: при уменьшении скорости вращения гребного вала угол разворота винта регулируемого шага (ВРШ) устанавливался так, чтобы поддержать постоянную скорость судна 10 уз. При этом скорость вращения вала уменьшалась на 12 % от номинального значения. Температура коллектора ГД снизилась на 7 %, а в цилиндрах ГД – на 10 %. Число оборотов турбины уменьшилось на 14 %, что привело к снижению давления воздуха наддува. Давление в цилиндрах ГД уменьшалось в среднем на 8 %. В результате расход топлива уменьшился на 370–380 кг/сут.

Изменения параметров ВГ в зависимости от режима работы следующие: напряжение ВГ стабилизировалось на уровне 390 В с помощью регулятора напряжения типа SMUX2R. Напряжение возбуждения нарастало, но оставалось близким к номинальному значению 230 В. Ток возбуждения также нарастал, но не превысил предельное значение 55 А. Сила тока нагрузки ВГ возросла, но не превышала номинальное значение. Ток нагрузки мощных потребителей электроэнергии – подруливающего устройства и аквамастера – увеличивался, но не превысил номинальное значение. Производительность механизмов, питающихся от ВГ, изменилась в небольшой степени, что практически не влияет на работу судна.

Эффективная стабилизация напряжения ВГ при уменьшении скорости вращения гребного вала оказалась возможной в связи с работой ВГ на ненасыщенном участке его характеристики холостого хода (запас по напряжению составил ориентировочно 16 %). Предельная величина снижения скорости вращения ГД ограничивается величиной тока возбуждения ВГ и величиной тока нагрузки потребителей.

Определены места съема аналоговых сигналов с главного распределительного щита (ГРЩ) судна на АЦП ЭВМ, а также места ввода цифровых сигналов через ЦАП на объекты (клеммы шунтов и добавочных сопротивлений приборов, клеммы катушек индуктивности в регуляторе напряжения). Осуществлено компьютерное управление режимами при автономной и параллельной работе ВГ и ДГ в течение 7 сут. на акватории Северной Атлантики.

Экономия дизельного топлива ГД за год ориентировочно (с учетом простоев судна) может составить до 250 т.

Натурные исследования подтвердили возможность реализации безвахтенного обслуживания по классу автоматизации А1. Результаты натурных исследований снимались также в отдельные экстремальные моменты рейса. Результаты натурального эксперимента подтвердили данные математического моделирования как для автономной, так и для параллельной работы ВГ и ДГ.