

## ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*А. Г. КАПУСТИН, К. В. ТЕРЕЩЕНКО*

*Белорусская государственная академия авиации, г. Минск*

В работе рассматривается вопрос повышения безопасности и надежности работы систем электроснабжения транспорта. Известно, что возмущения оказывают существенное влияние на качество электроэнергии систем электроснабжения, следовательно, на надежность работы и бесперебойность питания приемников электроэнергии. В работе рассмотрен вопрос синтеза инвариантной системы регулирования напряжения системы электроснабжения, используемой на любом виде транспорта и позволяющей полностью компенсировать влияние возмущений, действующих на систему электроснабжения в статических и динамических режимах. Это позволит обеспечить питание приемников кондиционной электроэнергией без перерывов в питании, что положительно повлияет на безопасность и надежность работы не только приемников электроэнергии, но и системы в целом.

До недавнего времени вопросы повышения качества электроэнергии систем электроснабжения транспорта решались путем достижения компромисса между требуемыми статическими и динамическими характеристиками системы и возможностями систем регулирования выходных параметров (напряжение и частота тока).

В работе показано, что качество электроэнергии систем электроснабжения в основном определяется характеристиками систем регулирования напряжения и частоты тока. Эксплуатирующиеся в настоящее время системы регулирования (аналоговые), хотя и обладают достаточно высокими показателями, однако возможности их дальнейшего совершенствования в пределах, заложенных в них принципов регулирования, практически исчерпаны [1, 2].

Проведенный анализ аппаратных средств и методов, с помощью которых можно синтезировать систему регулирования, показал, что наиболее перспективным направлением повышения качества электрической энергии систем электроснабжения является применение цифровых комплексов (методов) управления для регулирования выходных координат этих систем. Кроме известных преимуществ цифровых систем перед аналоговыми следует отметить и то, что переход на цифровые методы управления позволяет ликвидировать разрыв между теорией и практикой автоматического управления в практической реализации цифрового регулирования, обеспечить возможность использования методов оптимального управления, реализации нелинейных законов управления, внедрения машинного обучения и дополненной реальности.

Показано, что применение цифровых методов управления дает возможность осуществить регулирование напряжения и частоты тока в установившемся и переходном режимах систем электроснабжения оптимальным образом. Разработаны алгоритмы регулирования напряжения в статических и переходных режимах работы системы электроснабжения, которые способны практически полностью компенсировать влияние основных возмущений, действующих на систему.

Для подтверждения теоретических положений работы выполнено имитационное моделирование работы структурной схемы системы автоматического регулирования напряжения при использовании цифровых вычислительных комплексов. Работа рассматриваемой системы регулирования описана системой операторных дифференциальных уравнений и разрешена относительно выходной координаты системы электроснабжения – отклонения напряжения от заданного значения. Анализ выражения передаточной функции системы регулирования показал, что числитель передаточной функции не равен нулю, а знаменатель является конечной величиной. Исходя из этого сформулированы условия инвариантности [1, 2]. В соответствии с этими условиями для полной компенсации возмущений в статическом режиме работы системы электроснабжения необходимо, чтобы произведение числителя передаточной функции и возмущения равнялось нулю. Учитывая, что в установившемся режиме работы системы электроснабжения типовым возмущением является постоянная величина, то условие инвариантности может быть выполнено при равенстве оператора цифрового элемента системы регулирования и оператора Лапласа [2, 3].

Исходя из этих положений разработан алгоритм полной компенсации возмущений в установившемся (статическом) режиме работы системы электроснабжения для систем регулирования

напряжения, реализуемый в бортовом цифровом вычислительном комплексе. При этом учитывались ограничения на пределы изменения напряжения и частоты тока в статических режимах работы в зависимости от изменения токов нагрузки и изменения частоты вращения авиадвигателя.

При разработке алгоритма регулирования напряжения в переходных режимах работы установлено, что использование лишь цифровых элементов не дает возможности обеспечить полную компенсацию указанных возмущений из-за наличия в реальных системах регулирования энергетических ограничений на управляющие воздействия и нелинейностей, определяющих ограничения координат системы электроснабжения. Поэтому предложено синтезировать систему регулирования напряжения в переходных режимах исходя не из приближенного выполнения условий инвариантности, а из условия получения оптимального переходного процесса. Для этого, учитывая требования к системам регулирования напряжения и к качеству электрической энергии систем электроснабжения воздушных судов, выбран критерий оптимальности, обеспечивающий минимум длительности переходного процесса [2–5].

Для проверки эффективности действия данного критерия разработана математическая модель бесконтактного синхронного генератора типа ГТ мощностью 120 кВ·А и синтезирован закон регулирования напряжения при действии управляющего воздействия в соответствии с критерием оптимальности. Для рассматриваемого генератора оптимальное по быстродействию управление содержит два интервала [2, 3, 5]. Определены моменты времени переключения сигнала управления с одного интервала на другой, при которых обеспечивается перевод объекта из начального состояния (обусловленного действием возмущения) в конечное за минимально возможное время. Моменты переключения оптимального управления определены из решения системы дифференциальных уравнений математической модели генератора для первого и второго интервала управления. При этом выявлено, что при переключении управления состояние объекта мгновенно не изменяется.

С учетом этих данных разработан алгоритм регулирования напряжения при коммутациях приемников электроэнергии (нагрузки) в переходном режиме работы системы электроснабжения.

Имитационное моделирование системы регулирования напряжения с учетом синтезированных алгоритмов позволило установить следующее: минимально возможная длительность переходного процесса по напряжению при коммутации номинальной нагрузки составляет  $(18–21) \cdot 10^{-3}$  с; при оптимальном по быстродействию регулировании напряжения обеспечивается минимально возможное значение величины перерегулирования, которое на 25–35 % меньше, чем при использовании систем с регуляторами напряжения аналогового типа. При этом длительность переходных процессов уменьшается в 5–7 раз. Таким образом, применение цифровых вычислительных устройств с реализацией в них алгоритмов, синтезированных на основе методов теории инвариантности и оптимального управления, открывает широкие возможности дальнейшего повышения качества электрической энергии систем электроснабжения транспортных средств.

#### Список литературы

- 1 Данилова, Н. Н. Основы математической теории оптимальных процессов : учеб. пособие / Н. Н. Данилов, В. В. Мешечкин. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2004. – 218 с.
- 2 Васильев, Д. Системы автоматического управления / Д. Васильев, В. Чуич. – Рига : Палмарий, 2012. – 200 с.
- 3 Адкинс, Б. Общая теория электрических машин / Б. Адкинс. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.
- 4 Лайбль, Г. Теория электрической машины при переходных процессах / Г. Лайбль. – М. : Госэнергоиздат, 1965. – 168 с.
- 5 Фельдбаум, А. А. Методы теории автоматического управления / А. А. Фельдбаум, А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1971. – 744 с.

УДК 629.4.027.2

## К ВОПРОСУ РЕСУРСА БОКОВЫХ РАМ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ И ИХ КОНСТРУКТИВНОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

С. В. КАРА

*Филиал «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця», г. Киев*

Трехэлементные тележки типа 18-100 и их аналоги являются основным типом тележек для железнодорожных грузовых вагонов в Украине и других странах СНГ. Кроме того, что данный тип тележек грузовых вагонов является морально устаревшим с точки зрения динамических качеств и