

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В.Н. Грачев (Санкт-Петербург)

Введение. В настоящее время широко распространенным и эффективным средством разработки электронной техники стало применение математического моделирования. Математическое моделирование в последние десятилетия оформилось в отдельную междисциплинарную область знаний с присущими ей объектами, подходами и методами исследования. Как правило, в работах этого направления основное внимание уделяется методам исследования собственно математических моделей, качественному анализу решений, новым эффектам в исследуемых процессах и явлениях [1].

Только доскональное знание объекта моделирования соответствующей предметной области, а также возможность говорить на одном языке со специалистами-заказчиками модели позволяет надеяться на успешную реализацию того или иного проекта по созданию математической модели процесса или явления [1].

Состояние вопроса. Традиционно основная часть количественной информации, необходимой для принятия окончательного решения (как по степени детализации, так и по уровню достоверности), формировалась на стадии экспериментальной отработки технических устройств. По мере их усложнения и удорожания, а также удлинения стадии их экспериментальной отработки, значимость проектировочных расчетов стала расти, возникла необходимость в повышении достоверности таких расчетов, обеспечивающих более обоснованное отсеивание альтернативных решений на начальной стадии проектирования и уточненную формулировку количественных критериев для структурной и параметрической оптимизации [2].

Быстрое развитие наукоемких отраслей, к которым следует отнести современное кораблестроение и приборостроение, привело к дальнейшему усложнению разрабатываемых и эксплуатируемых технических устройств и систем. Их экспериментальная отработка стала требовать все больших затрат времени и материальных ресурсов, а в ряде случаев растущие затраты превратились в проблему, не имеющую приемлемого прямого решения [2].

Актуальность. В этих условиях существенно увеличилось значение расчетно-теоретического анализа характеристик таких устройств и систем. Этому способствовал и прорыв в совершенствовании вычислительной техники, приведший к появлению современных ЭВМ с большим объемом памяти и высокой скоростью выполнения арифметических операций. В результате возникла материальная база для становления и быстрого развития *математического моделирования*, появились реальные предпосылки для использования *вычислительного эксперимента* не только в качестве расчетно-теоретического сопровождения на стадии отработки технического устройства, но и при его проектировании, подборе и оптимизации его эксплуатационных режимов, анализе его надежности и прогнозировании отказов, аварийных ситуаций, а также при оценке возможностей форсирования характеристик и модернизации технического устройства [3].

История вопроса. *Определенные* предпосылки к широкому применению математического моделирования и вычислительного эксперимента в технике были созданы благодаря разработке методов аналогового моделирования. Основу большинства этих методов составляло использование электрических моделей-аналогов для исследования процессов в механических, тепловых и гидравлических системах. Явления считают математически аналогичными, если их описывают одинаковые по форме уравнения. Математическая аналогия между процессами в электрических цепях и другими физическими явлениями позволяет создать моделирующие установки, которые, по существу, являются специализированными аналоговыми вычислительными машинами (АВМ) [4].

В настоящее время математическое моделирование и вычислительный эксперимент с использованием ЭВМ стали составными частями общих подходов, характерных для современных информационных технологий. Не менее важно и то, что современные средства отображения информации дают возможность вести с ЭВМ диалог, то есть анализировать альтернативные подходы, проверять предположения, экспериментировать с *математической моделью* [1, 3, 4].

Практическая реализация возможностей математического моделирования и вычислительного эксперимента существенно повышают эффективность инженерных разработок, особенно при создании принципиально новых, не имеющих прототипов, систем управления и приборов, что позволяет сократить затраты времени и средств на использование в технике передовых достижений физики, электротехники, механики и других фундаментальных наук. Отмеченные возможности математического моделирования и вычислительного эксперимента еще далеко не исчерпаны, представляются достаточно перспективными и поэтому заслуживают детального рассмотрения [1, 4].

Целесообразно начинать работу в области математического моделирования именно с простейших моделей, иллюстрирующих основные законы управления, и затем постепенно наращивать сложность путем введения дополнительных факторов [1].

Реализация цифровых моделей на примере проектирования в АО «НПФ «Меридиан». В АО «НПФ «Меридиан» широко используется применение цифровых моделей и математического моделирования при разработке практически всех выпускаемых систем. Для моделирования собственных систем разработчики предприятия используют такие программные пакеты, как MultiSim, MicroCap, Proteus, MatLab/Simulink. Более широкое распространение получила программа MicroCap ввиду ее удобного и интуитивно понятного интерфейса, обширной элементной базы, встроенных инструментов для работы с цифровой моделью. В качестве примера описано построение цифровой модели статического преобразователя корабельной автоматической системы компенсации магнитного поля корпусных конструкций [5].

Построение цифровой модели выполняется, как правило, одновременно с математическим моделированием, на каждом этапе они дополняют друг друга. Так как в большинстве статических преобразователей используется транзисторная мостовая схема, то целесообразно начать с разработки модели мостовой схемы, пример которой показан на рис. 1. Данная модель является упрощенной и выполнена на элементах, в которых не закладываются сложные математические действия и операторы [5, 1].

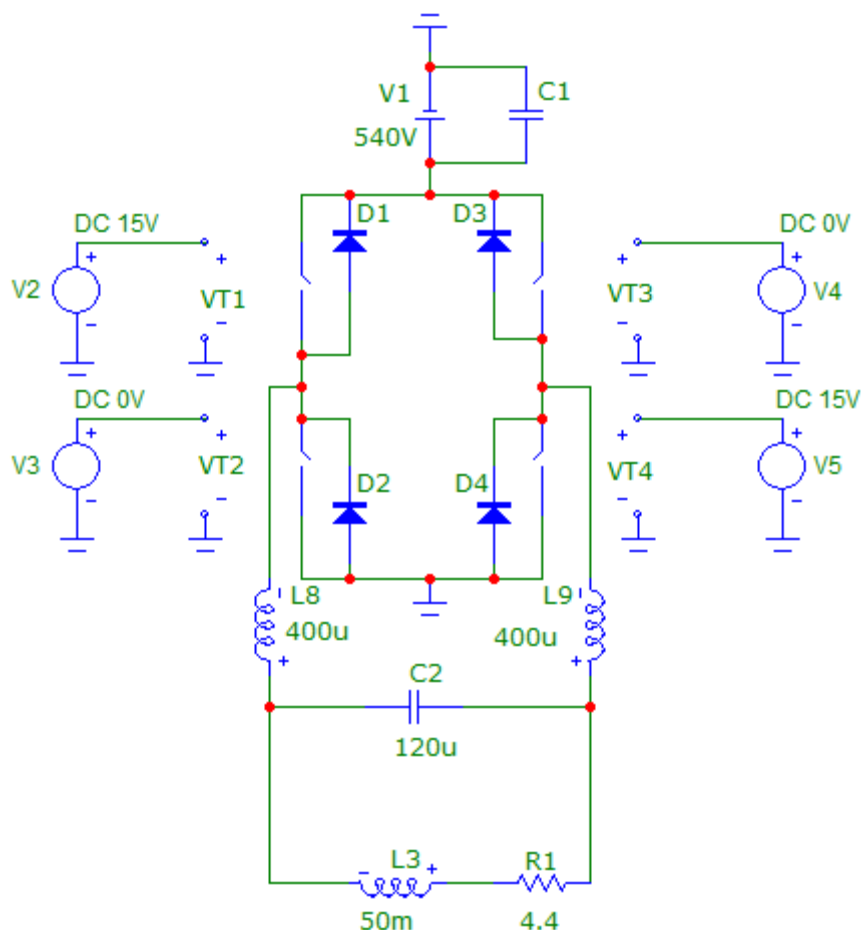


Рис. 1. Модель транзисторной мостовой схемы в программе MicroCap

Транзисторы VT1-VT4 заменены переключателями, управляемыми напряжением на входе переключателя. Напряжение питания моделирует источник питания V1, а управляющие сигналы имитируются источниками напряжения V2-V5, позволяющими генерировать сигналы различной формы (постоянное напряжение, синусоидальное, треугольное, импульсное, экспоненциальное, кусочно-линейное и т.д.). Также в составе модели содержатся пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, дроссели), которые, благодаря заложенному в них математическому аппарату, ведут себя, как приближенные к реальности компоненты с определенной степенью допущения. Стоит отметить, что в библиотеках MicroCap имеются элементы, имеющие серийно выпускаемые прототипы и элементы, являющиеся лишь математическими операторами [1].

Проверка модели должна начинаться с подачи управляющих сигналов постоянного напряжения с источников V2-V5, при которых достаточно просто выполнить расчет напряжения и тока в нагрузке R1. Таким образом, проверяется адекватность поведения модели [5].

В любой программе для выполнения цифровых моделей очень важным моментом является возможность отображения результатов моделирования. Программа MicroCap обладает одним из самых удобных средств отображения результатов моделирования. Если работа осуществляется с постоянными напряжениями, то удобно вызвать функцию

«Динамический анализ по постоянному току Dynamic DC», которая позволяет определить напряжения, токи и направления токов в любой точке схемы в режиме реального времени, как показано на рис. 2, что избавляет разработчика от значительных затрат времени по расчетам режимов постоянного тока. К примеру, если изменяется значение напряжения источника питания V1, то на цифровой модели сразу отражаются изменения значений токов и напряжений [5].

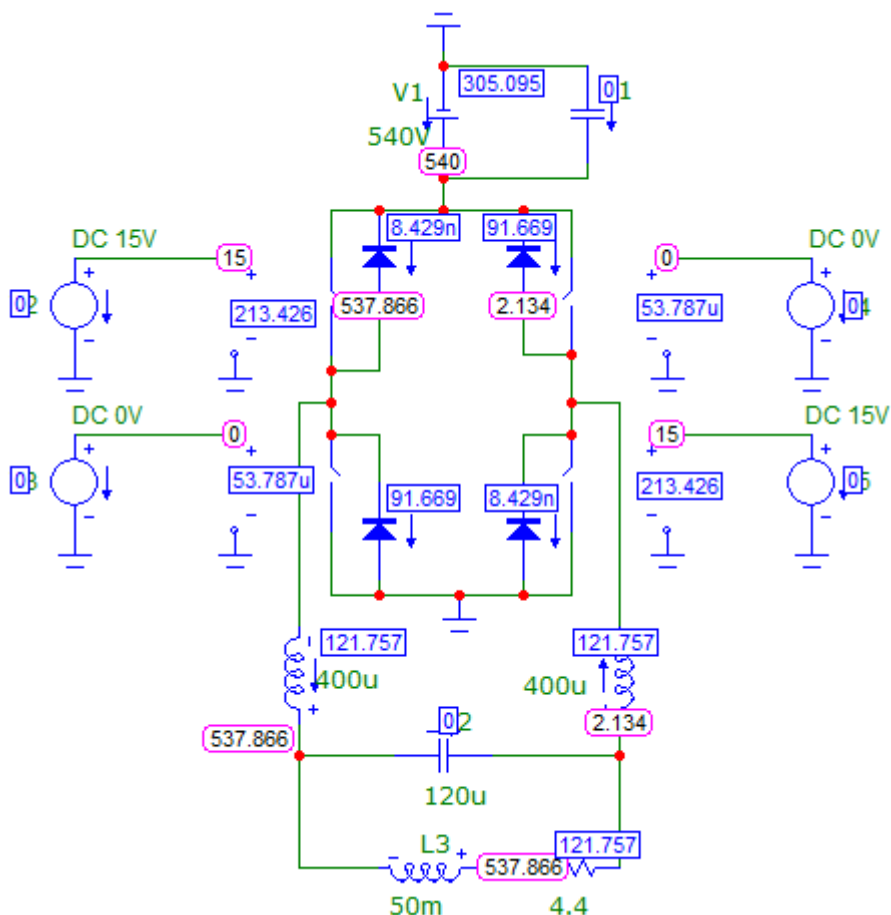


Рис. 2. Отображение информации об электрических характеристиках

Еще одним положительным моментом программы MicroCap является возможность добавления анимационных блоков в цифровую модель, благодаря которым появляется возможность более оперативного управления моделью, как показано на рис. 3. В составе цифровой модели имеются соединители S1-S4, которые можно устанавливать в проводящее или отключенное состояния простым щелчком мыши, что во многих случаях позволяет более оперативно осуществлять эксперименты с моделью. Также в модели используется индикатор напряжения Meter1, который в режиме реального времени показывает разность потенциалов между двумя выбранными точками. Такой индикатор напряжения является информативным инструментом оперативного анализа результата, поскольку в режиме «Динамический анализ по постоянному току Dynamic DC» отображаются значения напряжений исключительно относительно общего провода схемы. Для разработчика полезен любой инструмент программы, который позволит ускорить создание модели, приближенной по своим свойствам и функциям к реальному изделию [5, 4].

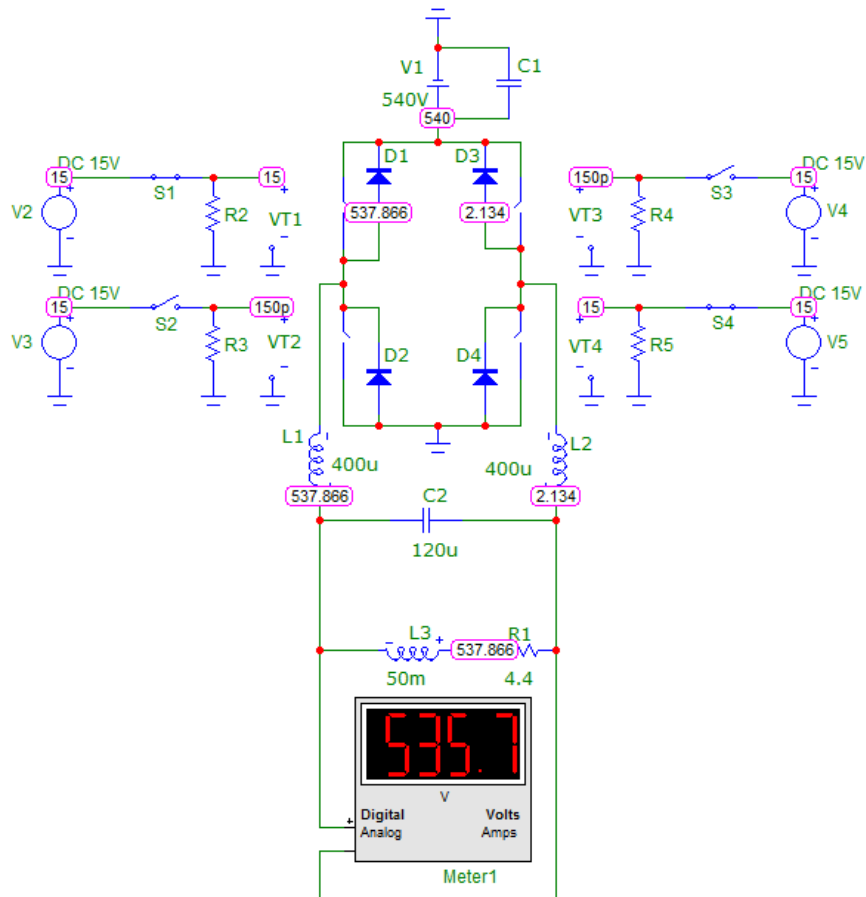


Рис. 3. Цифровая модель с анимациями

Если поведение упрощенной цифровой модели в разных режимах соответствует представлениям о работе схемы, содержащейся у специалиста, то можно начать усложнять модель, чтобы постепенно привести ее к максимальному соответствию с реальным изделием [4].

Реальная транзисторная мостовая схема работает в импульсном режиме, поэтому управляющие источники напряжения необходимо переключить в импульсный режим, как показано на рис. 4 [5].

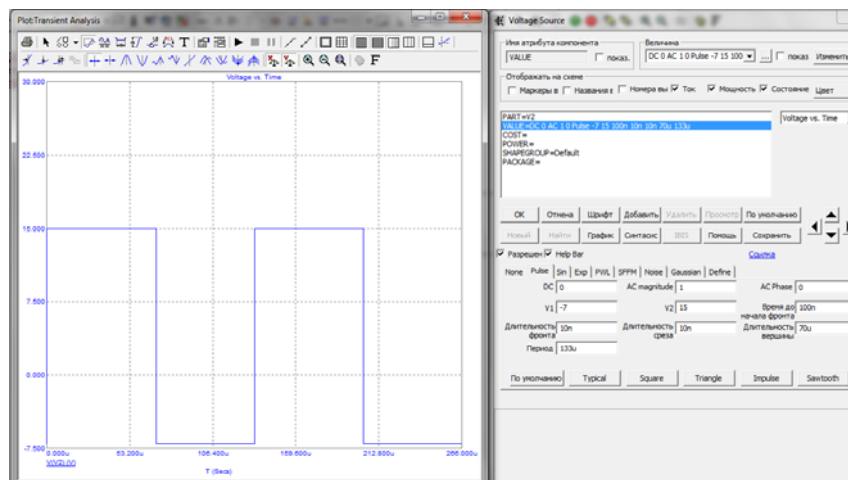


Рис. 4. Настройка управляющего источника напряжения

В приведенном случае управляющие источники V1 и V4 настраиваются на частоту управляющих импульсов 7,5 кГц (приемлемая частота переключения для отечественных IGBT-транзисторов). Амплитуда напряжения от минус 7 В до плюс 15 В характерна для работы драйверов управления, а управляющие источники имитируют именно работу драйверов управления. Для того чтобы значение частоты импульсного сигнала составляло 7.5 кГц, выбираем значение периода T управляющего сигнала 133 мкс ($T = \frac{1}{7.5 \cdot 10^3} = 133$ мкс). Длительность импульса импульса (вершины) t выбираем 70 мкс.

Отсюда можно вычислить коэффициент заполнения импульса

$$D = \frac{t}{T} = \frac{70 \cdot 10^3}{133 \cdot 10^3} \approx 0,526$$

Соответственно теперь мы можем определить напряжение на нагрузке R1

$$U_{R1} = U_{out} \cdot D = 535,7 \cdot 0,526 = 281,95 \text{ В}$$

Далее в программе MicroCap возможно сравнить результаты вычислительного расчета и цифровой модели. При работе с импульсным напряжением использовать опцию «Динамический анализ по постоянному току Dynamic DC» нельзя, так она предоставляет правильные данные только при работе с постоянными напряжениями и токами. Для режима импульсных напряжений в программе MicroCap предусмотрено отображение результатов при работе с сигналами произвольной формы. Для этого используется режим «Анализ переходных процессов Transient», показанный на рис. 5. В графе «Time Range» устанавливается длительность времени осциллограммы. Графа «Макс. шаг по времени» соответствует шагу дискретизации микроконтроллера, который будет использоваться в реальном устройстве, поэтому желательно, чтобы они были одинаковыми [5].

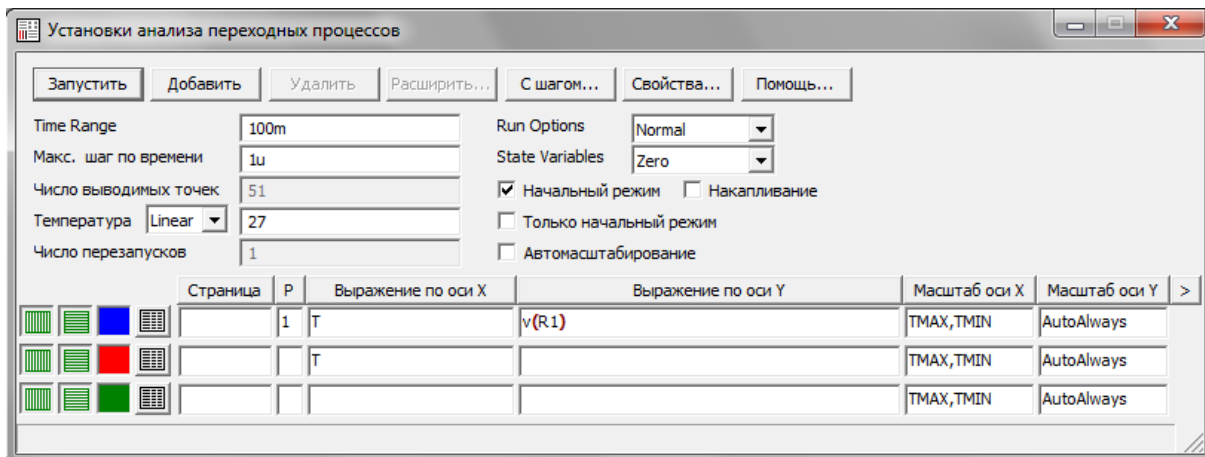


Рис. 5. Окно установки анализа переходных процессов

Просматривая полученную осциллограмму напряжения нагрузки R1 согласно рис. 6, нетрудно заметить, что полученное напряжение в установившемся режиме равно 287.5 В, что отличается от расчетного на 1,9%. Для проработки цифровой модели такое расхождение находится в пределах инженерной точности и является приемлемым [5].

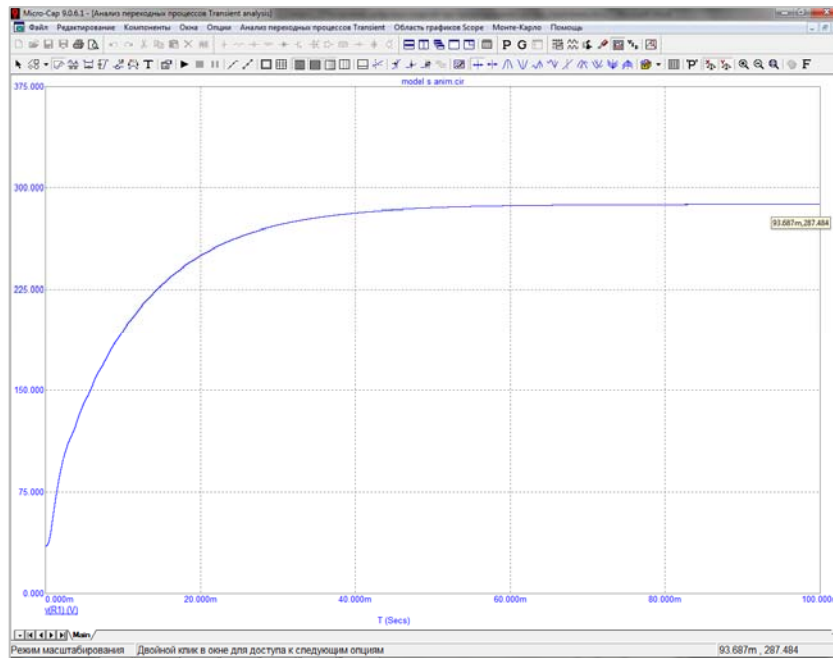


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на нагрузке R1

Следующим этапом усложнения цифровой модели является добавление возможности работы транзисторной мостовой схемы в различных режимах. Такое усложнение осуществляется за счет аналоговых мультиплексоров ADG409, модель которых также имеется в MicroCap [5].

Аналоговые мультиплексоры, показанные на рис. 7, имеют несколько входов и один выход. В зависимости от управляющих сигналов A0 и A1 один из входов мультиплексора соединяется с выходом, пропуская выбранный сигнал управления. Такое усложнение вносится по причине того, что существуют различные варианты подачи управляющих сигналов на затворы транзисторов [5].

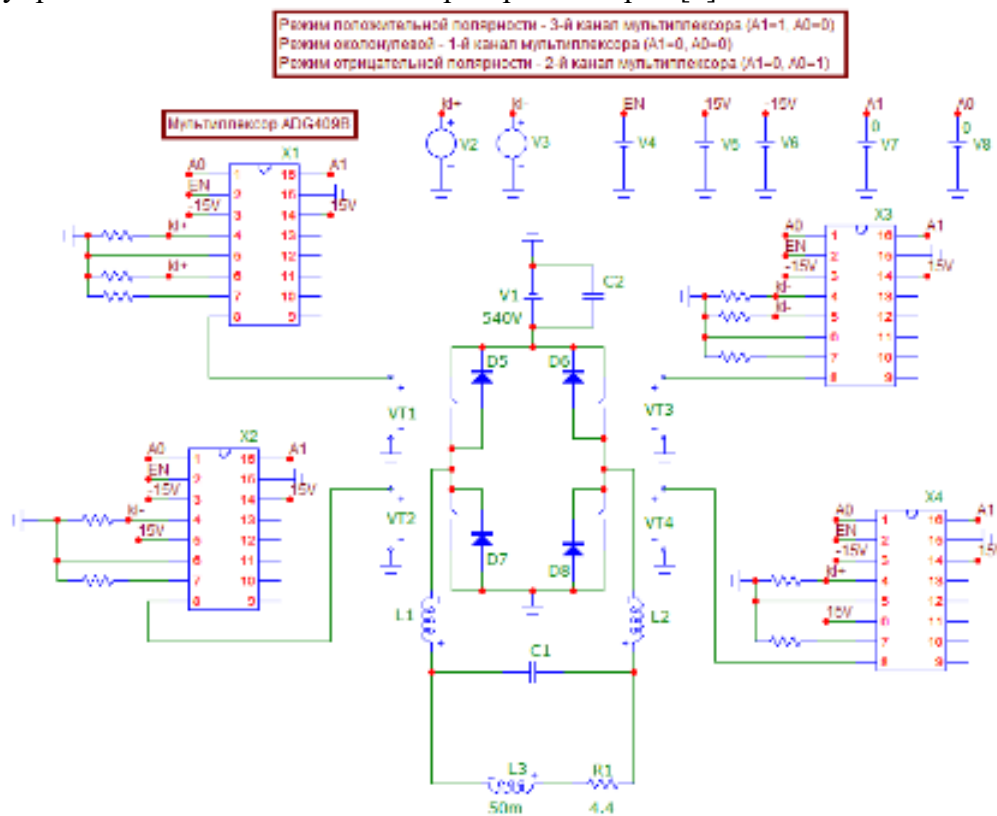


Рис. 7. Цифровая модель мостовой схемы с переключением через мультиплексоры

Построенная на данном этапе модель выполняет генерацию управляющих импульсов через управляющие источники, в меню которых заданы нужные параметры сигнала. Но в реальном изделии используется генератор сигналов с возможностью регулировки скважности управляющих импульсов [5].

На рис. 8 показана модифицированная модель, позволяющая сформировать три типа пилообразных сигнала за счет генератора пилообразного напряжения (каскады X3 и X4) и двух дифференциальных усилителей (каскады X5 и X6). Сигнал управления, который имитируется источником напряжения V1, проходит через дифференциальный усилитель (каскад X1) и поступает на компаратор (каскад X2), где сравнивается с выбранным пилообразным напряжением. В результате на выходе каскада X2 образуются импульсы с регулируемой скважностью, которая является результатом сравнения пилообразного сигнала и сигнала управления на входах компаратора. Таким образом, модель наращивается возможностью регулировки тока и напряжения на нагрузке R1 [5].

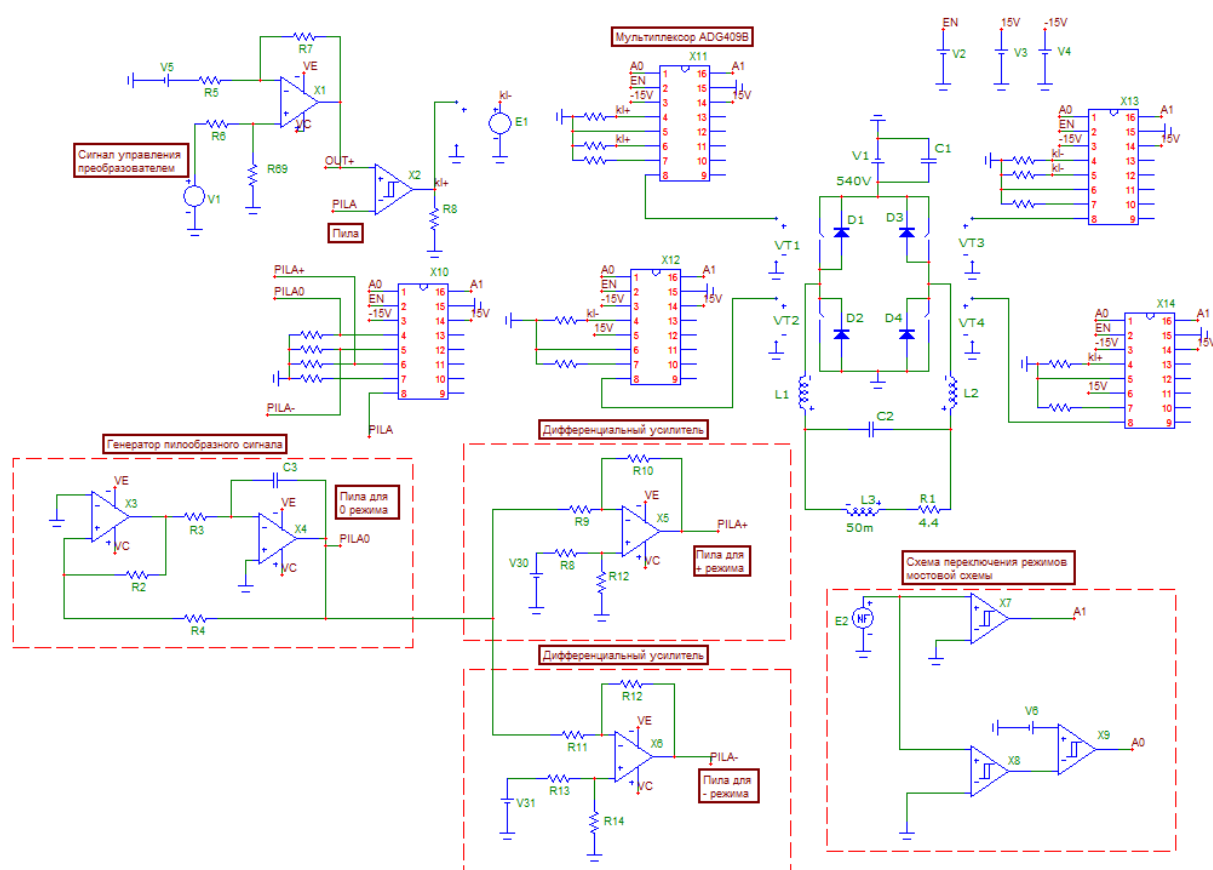


Рис. 8. Цифровая модель статического преобразователя без обратной связи по току

Последним этапом усложнения цифровой модели является внесение обратной связи, обеспечивающей устойчивость системы, и ПИД-регулятора, обеспечивающего необходимую точность отработки управляющего сигнала, как показано на рис. 9 [5].

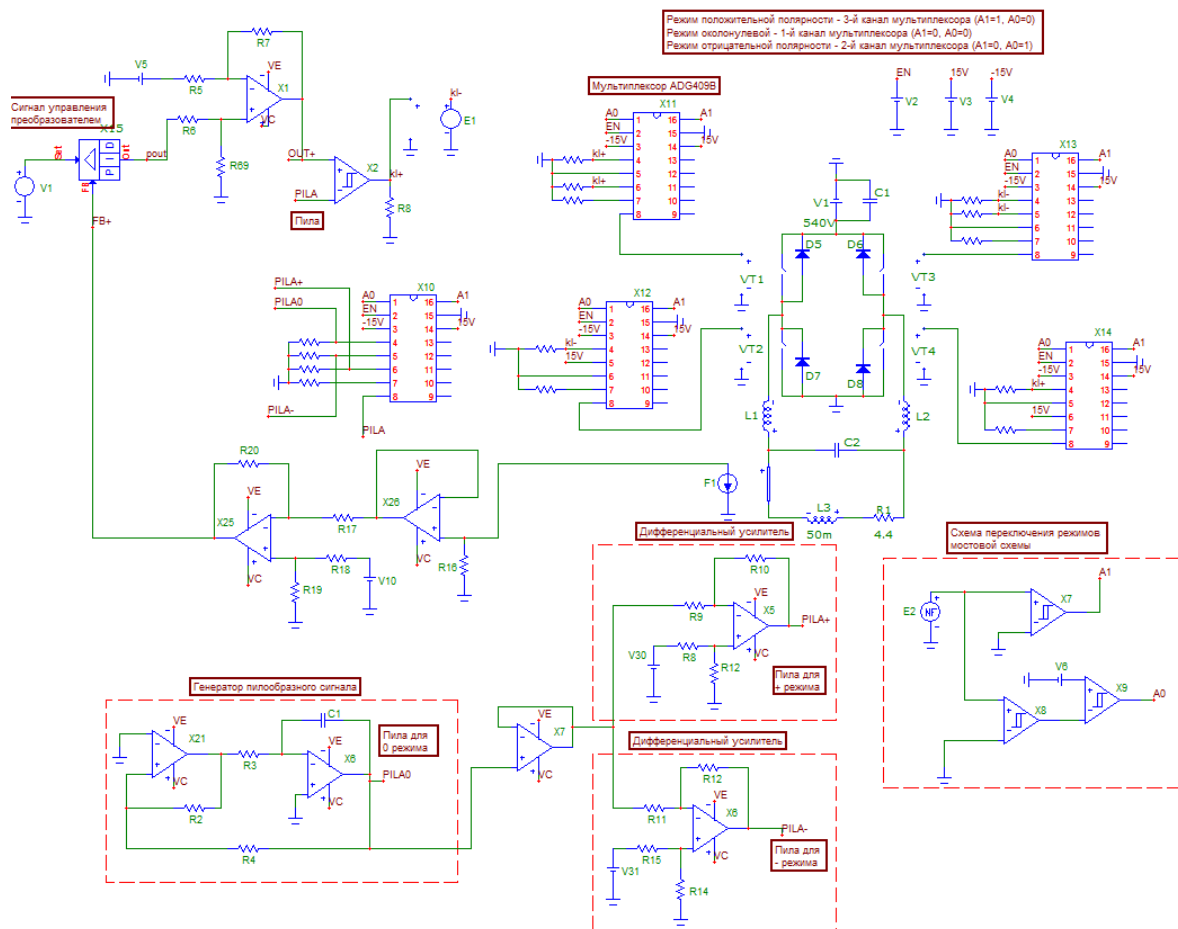


Рис. 9. Цифровая модель статического преобразователя с обратной связью по току

В цепь нагрузки резистора R1 добавлено передаточное звено F1, которое имитирует датчик тока. Сигнал обратной связи с датчика F1 через схему смещения уровня (каскад X25) поступает на вывод FB+ обратной связи ПИД-регулятора. Если ток в нагрузке R1 не соответствует сигналу управления, поступающего от источника V1, то ПИД-регулятор изменяет сигнал на своем выходе до тех пор, пока ток в нагрузке R1 не придет в соответствие с управляющим сигналом [5].

Закключение. В данной статье показаны только общие принципы методологии создания и отработки цифровой модели электронной системы управления. Инструментарий программ схемотехнического моделирования позволяет провести анализ работы модели не только во временной, но и в частотной области, моделировать работу при воздействии собственных шумов компонентов, численно оценить стабильность параметров при случайном отклонении номиналов в пределах заданных нормируемых допусков, при изменении температуры окружающей среды. Общей методологией создания и отработки цифровой модели электронной системы управления является необходимость активного взаимодействия разработчика и моделирующей среды. Обработывая цифровую модель в режиме «от простого к сложному», на каждом шаге итерации разработчик должен внимательно оценивать получаемый результат. Иными словами, электронная модель позволяет очень простыми средствами изменять режимы работы, добавлять и отключать элементы. Вывести из строя электронную схему из-за ошибки или неосторожного действия, как это может случиться при работе с физическим устройством, в принципе невозможно [1, 2, 3].

Применение математического моделирования в АО «НПФ «Меридиан» при разработке систем управления позволило до 50% сократить финансовые и временные затраты на физическое макетирование, осуществлять проверку физических устройств только в наиболее ответственных и сложных случаях, а для менее сложных устройств ограничиться только математическими моделями перед запуском в серийное производство.

Литература

1. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / Под. Ред. П.В. Трусова. М.: Логос, 2005. 440 с.
2. **Ванько В.И.** Вариационное исчисление и оптимальное управление: Учебник для вузов. Рек. МО / О.В. Ермошина, Г.Н. Кувыркин. Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ, 2001. 488 с.
3. **Малинецкий Г.Г.** Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в нелинейную динамику. М.: Изд-во Едиториал УРСС, 2002. – 256 с.
4. **Емельянов А.А.** Путь от аналоговых моделей к симулятору на цифровом компьютере. // Прикладная информатика. 2007. № 5. С. 41–53.
5. **Амелина М.А., Амелин С.А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012 617 с.