

Имитационное моделирование расчета переходной характеристики с помощью интеграла Дюамеля

И.В. Черных, А.И. Васильев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург

Аннотация: Рассматривается Simulink-модель, позволяющая рассчитывать переходные процессы объектов с помощью интеграла Дюамеля при любом виде входного воздействия. Описывается алгоритм работы S-функции. Благодаря особенностям S-функции, она может хранить значения предыдущего шага расчета Simulink-модели. Входной сигнал раскладывается на ступенчатые составляющие и запоминается время появления каждой ступени и ее величина. Для каждой ступени приращения входного сигнала S-функция вычисляет реакцию масштабируя переходную характеристику. Далее на каждом шаге расчета находится сумма таких реакций. В S-функции предусмотрена процедура освобождения памяти при достижении на каждой ступени конечной точки переходной характеристики. В статье приводятся результаты расчетов. Даются рекомендации по заданию параметров модели. Формулируется вывод о возможности применения модели для расчета динамических режимов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, интеграл Дюамеля, *Simulink*, переходная характеристика, ступенчатая функция, S-функция, модельное время.

На сегодняшний день одним из самых удобных методов исследования в различных областях науки и техники является имитационное моделирование. Этот метод используется в механике [1,2], материаловедении [3], электротехнике [4] и других, в том числе, и не технических областях науки. Для имитационного моделирования динамических объектов наиболее удобна программа *Simulink*, входящая в состав пакета *MATLAB* [5].

В некоторых случаях разработать математическое описание реального динамического объекта с использованием передаточных функций для моделирования в *Simulink* бывает слишком сложно или такая разработка

требует длительного времени. Однако, если объект линейный, то для него достаточно просто получить переходную функцию, подав на его вход единичное ступенчатое воздействие и зафиксировав выходной сигнал. Так, например, для электродвигателя со сложной кинематической передачей достаточно подать номинальное напряжение на его клеммы и снять осциллограмму угловой скорости вала. Для полученной переходной характеристики обычно выполняют аппроксимацию дробно-рациональной передаточной функцией. Однако, решение такой задачи вручную [6] очень трудоемкий процесс, а при использовании программного обеспечения, например, *MATLAB* [7], возможно получить неустойчивую передаточную функцию. Кроме того, выполнив синтез системы управления, последующие расчеты проводят именно с аппроксимирующей передаточной функцией, а не с моделью, точно отражающей динамику объекта.

В данной работе предлагается для расчета переходных процессов линейных объектов использовать интеграл Дюамеля. Методика расчета переходных процессов с помощью интеграла Дюамеля хорошо известна, но используется, как правило, в учебных задачах при простых входных воздействиях (сумма 2-3 ступеней) [8,9]. При произвольном входном воздействии, которым, например, может быть выходной сигнал регулятора, расчет переходных процессов становится неразрешимой задачей. Данную задачу можно решить при использовании программы *Simulink*. На рис. 1 показана схема модели.

Блок *Generator* вырабатывает входной сигнал сложной формы, который поступает на блок *Subsystem*, реализующий расчет с помощью интеграла Дюамеля, и на блок *Transfer Fcn*, задающий передаточную функцию звена второго порядка. Этот блок необходим только для сравнения результатов моделирования. В блок *Subsystem* заложена (в качестве параметра) переходная функция того же самого звена второго порядка. Блок *Subsystem*

содержит три последовательно включенных элемента: *IC* (блок задания начальных условий), *Quantizer* (квантователь) и *S-function* (S-функция). Именно S-функция реализует методику расчета с использованием интеграла Дюамеля. Входной произвольный сигнал квантуется блоком *Quantizer* по уровню с достаточно мелким шагом (например, 1% от максимального уровня входного сигнала) и поступает в блок *S-function*.

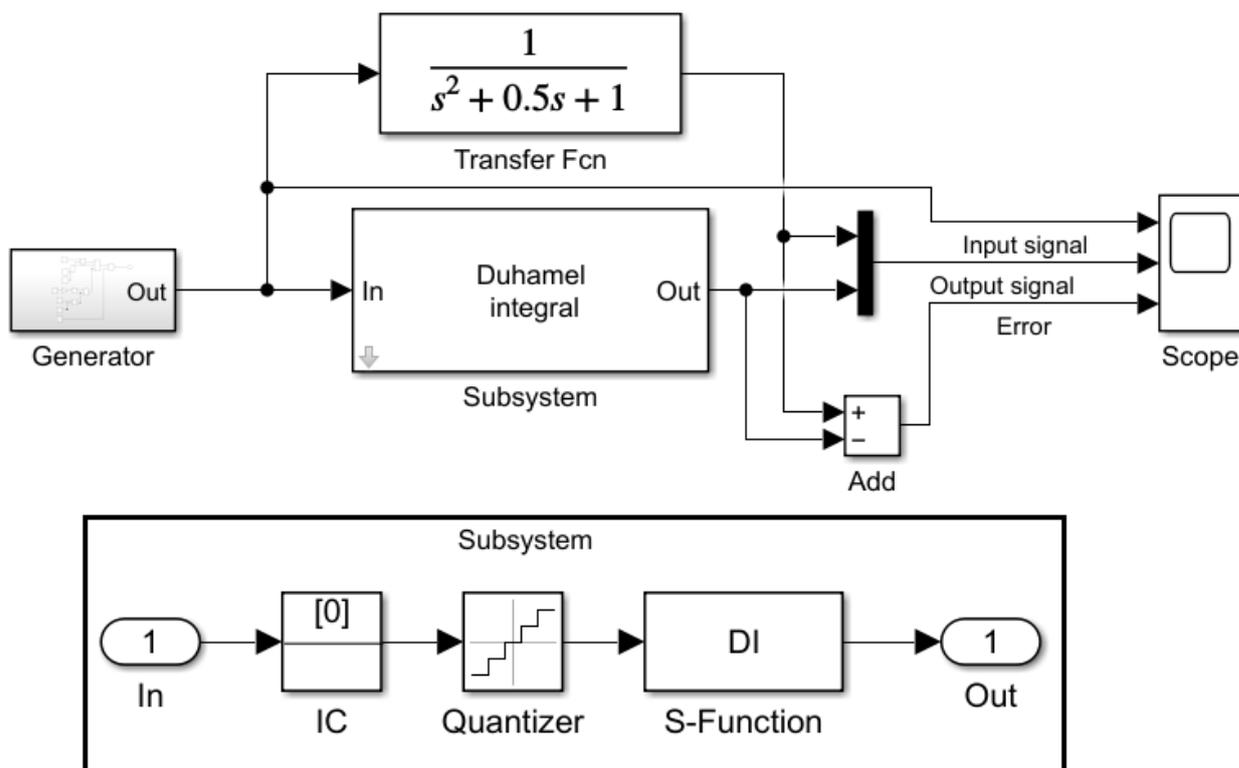


Рис. 1. – Схема модели

Благодаря особенностям S-функции, она может хранить значения предыдущего шага расчета Simulink-модели. В работе [10] это подробно описано на примере S-функции, реализующей буфер хранения значений переменных на предшествующих текущему расчетных шагах. Входной сигнал, поступающий от квантователя, раскладывается внутри S-функции на ступенчатые составляющие. Время появления каждой ступени и ее величина запоминается. Для каждой ступени, исходя из приращения входного сигнала, S-функция вычисляет реакции на ступени, масштабируя переходную характеристику по величине. Далее на каждом шаге расчета находится сумма

таких реакций. Эта сумма и является выходным сигналом блока *S-function*. В *S-функции* предусмотрена процедура освобождения памяти при достижении на каждой ступени конечной точки переходной характеристики. Значение переходной характеристики в конечной точке является установившимся значением. Таким образом, объем требуемой памяти для расчета не увеличивается выше некоторого предела, и не зависит от длительности модельного времени. Для вычислений в *S-функции* используются операции с матрицами и не применяются циклы. Благодаря этому скорость расчета модели достаточно высока. Интерполяция переходной характеристики осуществляется с помощью функции *interp1* сплайн-методом.

На рис. 2 показаны графики, иллюстрирующие принцип работы модели.

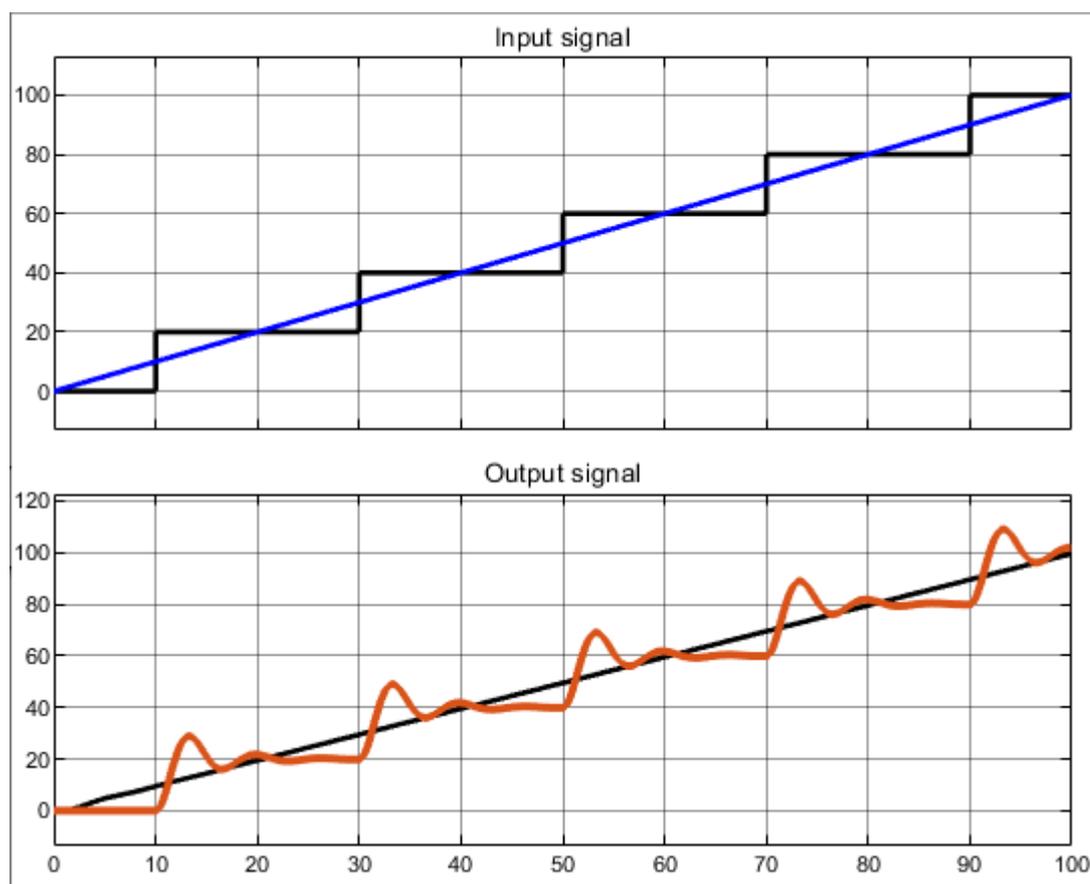


Рис. 2. – Принцип работы модели

На первой диаграмме показан линейно-изменяющийся входной сигнал и выходной сигнал квантователя. На второй диаграмме показан выходной сигнал «контрольного» блока *Transfer Fcn* и выходной сигнал S-функции. Шаг квантователя выбран достаточно большим (20 о.е.), чтобы наглядно продемонстрировать работу модели. На диаграмме видно, что выходной сигнал S-функции в каждый момент времени состоит из суммы реакций на ступенчатое приращение входного сигнала.

Рис 3. иллюстрирует работу модели при малом шаге квантования и входном сигнале сложной формы.

На первой диаграмме показан входной сигнал. На второй – выходной сигнал блока *S-function* и «контрольного» блока *Transfer Fcn*. Выходные сигналы блоков практически совпадают. На третьей диаграмме показана разность выходных сигналов блоков.

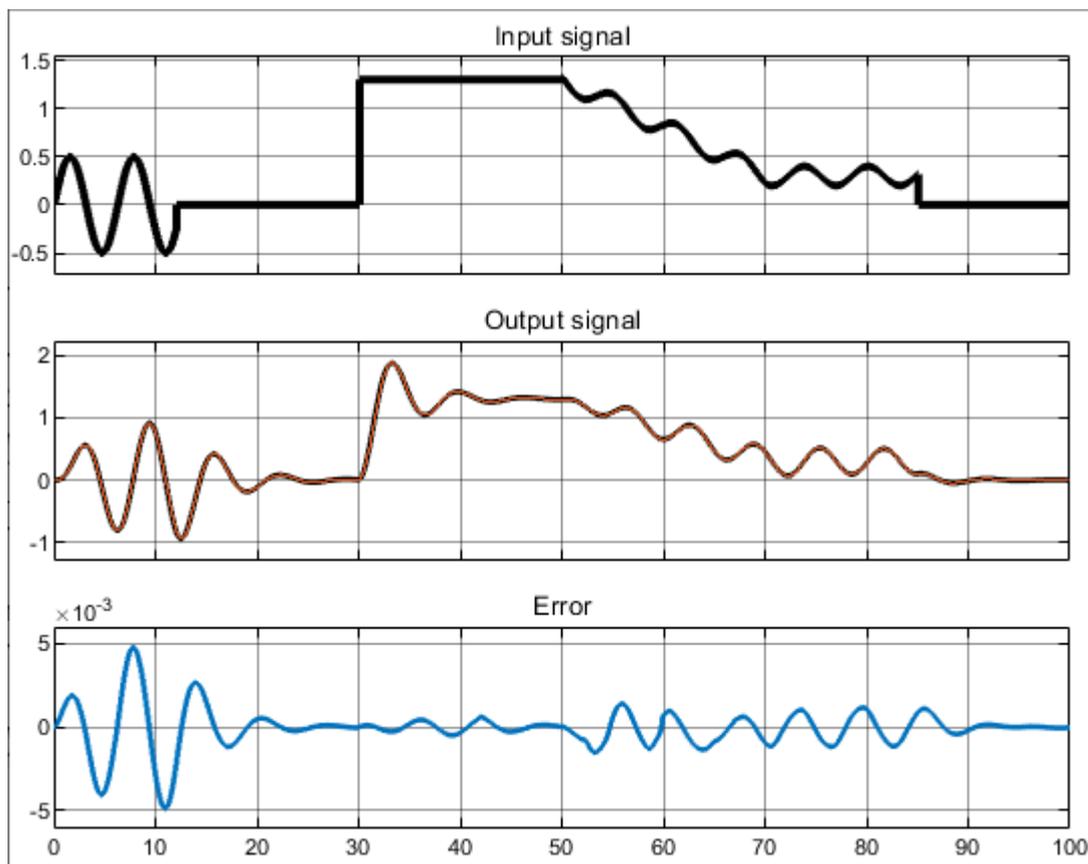


Рис. 3. – Диаграммы работы модели при входном сигнале сложной формы

Как видно из последней диаграммы погрешность расчетов не превышает 0,5%. Величина шага квантования в данном примере равна 0,01 о.е. Максимальный шаг модельного времени – 0,01с. Размер буфера для хранения расчетных значений предыдущего шага составил 1196 значений. Время расчета на компьютере с частотой процессора 3,7 ГГц и объемом памяти 64 Гб составило 5 с. При уменьшении шага квантования в 10 раз (0,001 о.е.) и шага модельного времени также в 10 раз (0,001 с) размер буфера составил 11200 значений, а время расчета увеличилось до 73 с. Погрешность расчета при этом оказалась равной 0,05%.

Особенностью модели является то, что по окончании расчета в окне диагностических сообщений *Simulink* выводится значение требуемого размера буфера. Это позволяет после предварительного расчета задать минимально возможный размер буфера тем самым увеличив скорость расчета.

Для блока Subsystem модели выполнено маскирование и разработано окно для ввода параметров модели. Окно параметров показано на рис. 4.

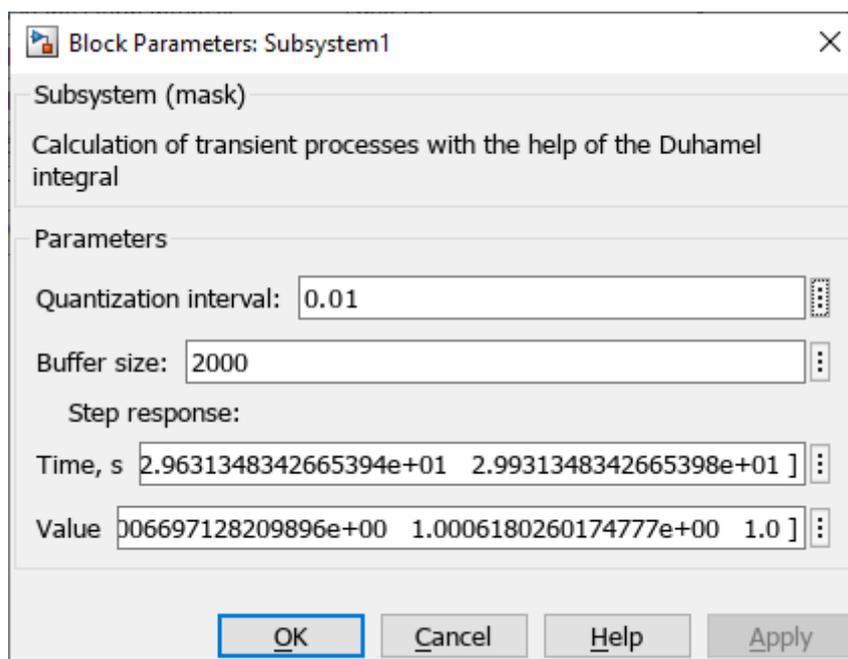


Рис. 3. – Окно параметров модели

Проведенные вычислительные эксперименты убедительно показывают возможность применения интеграла Дюамеля при имитационном моделировании динамических объектов в случае входного сигнала сложной формы.

Литература

1. Сидоров М.В., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование работы трансмиссии трактора МТЗ-82 в среде Simulink // Инженерный вестник Дона, 2009, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709

2. Сидорова А.В., Степин П.И., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование колебаний центра масс колесной машины с помощью программы Simulink // Инженерный вестник Дона, 2020, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6395

3. Санамян Г. И. Имитационное моделирование операций упрочнения поверхностным пластическим деформированием // Инженерный вестник Дона, 2008, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2008/69

4. Кралин А.А., Алтунин Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362

5. Dorf, R.C. and R.H. Bishop, 2008. Modern Control Systems. Pearson Education, pp: 519.

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. 7-е изд. М.: Высш. шк., 1978. 528 с.

7. System Identification Toolbox. Create linear and nonlinear dynamic system models from input-output data // URL: mathworks.com/help/ident/ (дата обращения: 24.10.2024).

8. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи.: Учеб. для электротехн. радиотехн. спец. вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.

9. Xijun, L., J. Fen and Z. Xia, 2017. Vibration theory and engineering applications. Machinery industry Press, pp: 100.

10. Черных И.В. Simulink. Среда для создания инженерных приложений / Под ред. Потемкина В.Г. М: Диалог-МИФИ, 2004. 247 с.

References

1. Sidorov M.V., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2009, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6709

2. Sidorova A.V., Stepin P.I., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6395

3. Sanamyan G I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2008, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2008/69

4. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362

5. Dorf, R.C. and R.H. Bishop, 2008. Modern Control Systems. Pearson Education, pp: 519.

6. Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki: Elektricheskiye tsepi. Ucheb. dlya studentov elektrotekhnicheskikh, energeticheskikh i priborostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov [Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits. Textbook for students of electrical engineering, power engineering and instrument-making specialties of universities]. 7-e izd. М.: Vyssh. shk., 1978. 528 p

7. System Identification Toolbox. Create linear and nonlinear dynamic system models from input-output data. URL: mathworks.com/help/ident/ (Date accessed: 24.10.2024).



8. Matkhanov P. N. Osnovy analiza elektricheskikh tsepey. Lineynyye tsepi.: Ucheb. dlya elektrotekhn. radiotekhn. spets. Vuzov [Fundamentals of Electrical Circuit Analysis. Linear Circuits: Textbook for Electrical and Radio Engineering Specialties of Universities]. 3-e izd. M.: Vyssh. shk., 1990. 400 p.

9. Xijun, L., J. Fen and Z. Xia, 2017. Vibration theory and engineering applications. Machinery industry Press, pp: 100.

10. Chernykh I.V. Simulink. Sreda dlya sozdaniya inzhenernykh prilozheniy [Simulink. Environment for creating engineering applications]. Pod red. Potemkina V.G. M: Dialog-MIFI, 2004. 247 p.

Дата поступления: 24.09.2024

Дата публикации: 14.11.2024