

О.В. ВАСИЛЕНКО, канд. техн. наук, доц. ЗГИА, Запорожье,
Е.Д. МОВЕНКО, м.н.с. ЗГИА, Запорожье

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРТОРА ТОКА, РАБОТАЮЩЕГО НА ИНДУКЦИОННУЮ УСТАНОВКУ

В статье представлена компьютерная модель высокочастотного преобразователя энергии со звеном повышенной частоты, работающего на индукционную установку. Проведен анализ математических процессоров. Представлена система уравнений динамической модели, адаптированной для программы VisSim. Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: компьютерная модель, преобразователь энергии, математические процессоры, система уравнений, динамическая модель.

Постановки проблемы. В настоящее время системы индукционного нагрева широко применяются в промышленности для нагрева перед пластической деформацией, объемной штамповкой, ковкой, прессованием, волочением и т.д. [1]. При проектировании технологического оборудования индукционного нагрева необходимо учитывать изменение мощности нагрузки в широком диапазоне, что, несомненно, требует применения в установках данного типа регулирования потока передаваемой энергии, которое осуществляется электронными системами.

Проблема проектирования оптимальных устройств данного типа тесно связано с вопросами математического моделирования. Однако, при реализации математических моделей возникают трудности получения адекватного решения с точки зрения погрешности воспроизведения реакции цепи, количества схемных элементов, типа этих элементов и т.п. В общем случае, математическая модель определяется как набор уравнений, описывающих поведение физической системы (в данном случае – системы полупроводниковый преобразователь – индуктор).

При моделировании и анализе систем полупроводниковых преобразователей (ПП), питающих индукционные установки (ИУ), в настоящее время большинство специалистов используют как универсальные математические процессоры (MathCAD, MatLab), так и специализированные, класса ECAD (PCAD, OrCAD, Micro-Cap и др.). Последние обладают обширными библиотеками моделей аналоговых и цифровых устройств и приборов электронной техники. Применение систем моделирования класса ECAD эффективно при детальном анализе сравнительно быстрых переходных процессов. При расчете стационарных режимов проявляются такие недостатки как: большие затраты машинного времени, низкая устойчивость вычислительных процессов, результаты расчетов не всегда достоверны.

Среда моделирования MatLab, расширение Simulink, имеет средства диалога, графики, объектно-ориентированного программирования. Для

моделирования систем созданы библиотеки элементов, в том числе электрических устройств: тиристорных и транзисторных ПП, элементов систем управления. Имеются библиотеки математических функций. Модели отдельных наиболее типичных электронных устройств представлены в библиотеках. Моделирование системы заключается в соединении друг с другом библиотечных элементов и определении их параметров. Однако, задача соединения библиотечных элементов в Simulink не всегда решается удовлетворительно, т.к. модели элементов рассматриваются во многих случаях как источники тока. При их соединении друг с другом часто оказывается необходимым использовать дополнительные сопротивления, которые позволяют устранить проблемы, возникающие при последовательном включении источников тока (топологические вырождения [2 – 4]). При этом, потери мощности на дополнительных резисторах достигают до 5 % от мощности устройств.

Уменьшение номиналов резисторов приводит к повышению "жесткости" систем уравнений (где коэффициент жесткости определяется минимальным и максимальным значениями постоянных времени переходного процесса). Поскольку, в универсальных математических процессорах используются явные методы численного интегрирования, для которых характерны проблемы потери устойчивости при анализе жестких схем, это, в свою очередь, приводит к увеличению затрат времени на расчеты. Введение же дополнительных сопротивлений в систему ПП – ИУ способствует уменьшению коэффициента жесткости, но при этом не отражается наличие резонансных колебаний, характерных для выбранного типа инвертора, вследствие чего снижается точность результатов моделирования устройств данного типа.

Так же можно добавить, что в Simulink используется представление полупроводниковых элементов в виде резисторов с переменными параметрами. При больших сопротивлениях полупроводниковых элементов в закрытом состоянии увеличиваются затраты машинного времени на расчеты. Для устранения этой проблемы полупроводниковые элементы шунтируются RC-цепями с ограниченными активными сопротивлениями. В мощных тиристорных преобразователях тиристоры запираются при обратных токах до 50-100 А. При запираии тиристоров указанные токи проходят через RC-цепи, вызывая коммутационные перенапряжения и потери энергии. В Simulink в моделях преобразователей тиристоры запираются при нулевом значении тока. По этой причине работа RC-цепей в библиотечных моделях ПП не соответствует работе этих цепей в реальных установках.

Из вышесказанного следует, что существует проблема выбора программного обеспечения и актуализируется задача разработки адекватных математических моделей при проектировании данных устройств.

Анализ литературы. Основные понятия и соотношения процесса индукционного нагрева описаны в [1], здесь также рассматриваются требования к источникам питания устройств индукционного нагрева. В

работах [2 – 4] проанализированы подходы и сформулированы основные принципы моделирования устройств силовой электроники, в том числе, совместно с системами управления. В [5] предлагается метод управления инвертором тока способом поочередного регулирования, на основе гармонического анализа приведены основные соотношения энергетических параметров схемы замещения. В работе [6] описываются методы моделирования преобразователей энергии с использованием коммутационных функций. Представленные методы легко реализуются в математических процессорах таких, как MatLab, MathCAD, что позволяет создавать интегрированные вычислительные блоки в процессе синтеза динамической модели, однако, не позволяют моделировать данные устройства совместно с системой управления.

В [7] проведено исследование импедансных характеристик последовательного резонансного контура цепи нагрузки системы индукционного нагрева. Предложен алгоритм определения границ изменения резонансной частоты и добротности колебательного контура при изменении температуры нагреваемого объекта. Основные методы формирования моделей и методики моделирования в среде математических процессоров рассмотрены в [8].

Цель статьи. Разработка экономичной математической модели системы ПП – ИУ, адаптированной для программного обеспечения, способного адекватно моделировать стационарные режимы.

Основные соотношения энергетики системы. В состав ПП входит инвертор тока (рис. 1, а), позволяющий осуществлять преобразование постоянного тока в переменный. Основные энергетические соотношения этого устройства могут быть выведены на основании эквивалентной схемы (рис. 1, б), полученной при обычных допущениях [5], а именно: устройство рассматривается как преобразователь с постоянной структурой и эквивалентным генератором, исследуется при работе на нагрузку, представляющую собой параллельное соединение эквивалентной индуктивности (L), активной составляющей индуктора (R) и емкости (C).

Регулирование среднего значения потребляемой энергии достигается за счет изменения времени открытого состояния вентильного элемента T_{uml} . Выходная частота f инвертора, в данном случае, постоянно настроена на резонанс, обеспечивая, таким образом, минимизацию времени задержки на включение и выключение силовых коммутирующих приборов.

Изменение тока нагрузки осуществляется фазовым способом, за счет изменения одной относительно другой задержек включения вентильных элементов (так называемого угла перекрытия или угла коммутации (α) и описывается следующим соотношением [6]:

$$i(t) = I_d \cdot A(\alpha, t), \quad (1)$$

где I_d – среднее значение тока индуктивности L_ϕ (рис. 1, а) $A(\alpha, t)$ представляет собой коммутационную функцию типа меандр, со сдвигом начальной фазы на угол $\varphi(t)$,

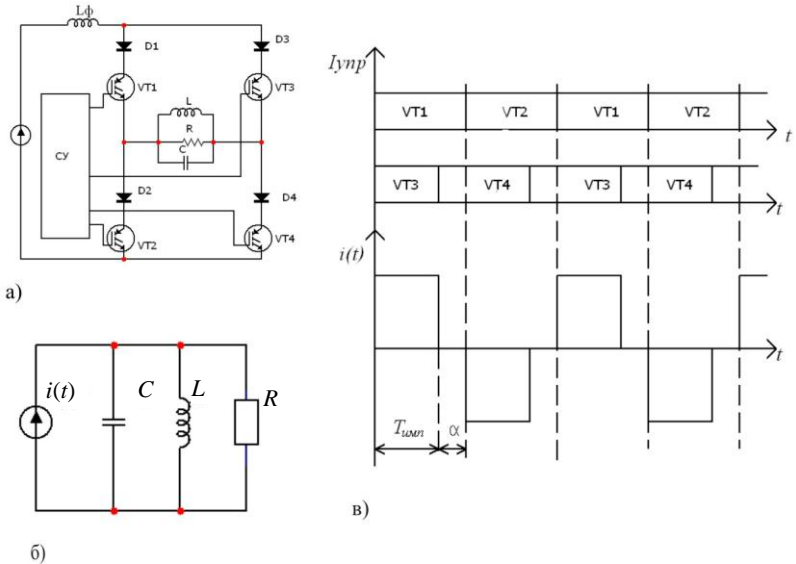


Рис. 1. Инвертор тока – а) принципиальная схема инвертора тока; б) эквивалентная схема; в) управляющие сигналы и ток эквивалентного генератора

В этом случае $A(\alpha, t)$ может быть описана следующим соотношением:

$$A(\alpha, t) = \frac{1}{2} [B(\alpha, t) + Q(\alpha, t)], \quad (2)$$

где:

$$B(\alpha, t) = \text{sign}[\sin(\omega t \pm \varphi(t))], \quad (3)$$

$$Q(\alpha, t) = \text{sign}[\sin(\omega t \pm \varphi(t) \pm \alpha)]. \quad (4)$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, t – независимая переменная (время).

Электромагнитные процессы в преобразователях описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), являющимися уравнениями функции относительно одной переменной и содержащие производные от этой переменной. Для эквивалентной схемы (рис. 1, б) с известными параметрами нагрузки, система уравнений ОДУ, составленная по

первому и второму законам Кирхгофа в матричной форме и приведенная к нормальной форме Коши с нулевыми начальными условиями, имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_C \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_C \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i(t), \quad (5)$$

где u_C – мгновенное значение напряжения на емкости C (напряжение на нагрузке) (рис. 1, б); i_L – мгновенное значение тока индуктивности L (рис. 1, б); $G = \frac{1}{R}$ – проводимость, R – активная составляющая нагрузки.

Решая систему относительно напряжения на нагрузке, получим:

$$D(t, y) = D \cdot y_0 + i(t) \cdot s_0, \quad (6)$$

где $D = \begin{bmatrix} -\frac{G}{C} & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}$ – матрица постоянных схемы; $y_0 = \begin{bmatrix} u_C \\ i_L \end{bmatrix}$ – вектор

начальных условий при $t = 0$; $s_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор-столбец постоянных схемы.

Определим правую часть уравнения (6) (матрицу $D(t, y)$), которая в данном случае является вектором с двумя компонентами (по числу уравнений в системе), где y – вектор с переменными u_C и i_L .

Решение системы уравнений (5) для u_C в системе MathCAD имеет вид:

$$u_C(t) = rkfixed(y, 0, k, p, D). \quad (7)$$

Соответственно, входное напряжение инвертора (напряжение $u_{L\phi}$) описывается следующим выражением

$$u_{L\phi} = \frac{u_C(t)}{A(\alpha, t)} = \frac{rkfixed(y, 0, k, p, D)}{A(\alpha, t)}. \quad (8)$$

В ходе индукционного нагрева мощность, потребляемая заготовкой при гармоническом изменении амплитуды напряженности магнитного поля H , определяется следующим соотношением [7]

$$P = \frac{H^2 \cdot S}{2} \cdot \frac{\rho}{\Delta s}. \quad (9)$$

где S – площадь поверхности нагреваемого объекта; Δs – глубина проникновения электромагнитного поля в заготовку; ρ – удельное сопротивление материала заготовки, зависящее от температуры θ .

Отсюда, получаем связь эквивалентного сопротивления R с амплитудным значением тока в обмотке индуктора I

$$R = \frac{H^2 \cdot S}{I^2} \cdot \frac{\rho}{\Delta s}. \quad (10)$$

Изменение в процессе нагрева импеданса системы "индуктор – нагреваемый объект" требует регулирования напряженности поля индуктора, что достигается регулированием тока, напряжения на зажимах индуктора и частоты. Также имеет место зависимость тока индуктора от температуры заготовки при заданном режиме нагрева. При сквозном высокотемпературном нагреве, как показано в [1], эффективен режим с постоянной потребляемой мощностью. Определение требуемого тока для стабилизации мощности индуктора возможно путем решения уравнения:

$$P = I(\alpha)^2 \cdot R(I(\alpha), \theta) = const, \quad (11)$$

где $I(\alpha)$ – действующее значение тока индуктора зависящее от угла коммутации α .

Совместное использование уравнений (9) – (11) позволяет считать функцию $I(\alpha)$, определенной при фиксированном значении потребляемой мощности. Сложность определения функции $I(\alpha)$ во всем диапазоне изменения мощности состоит в зависимости активной составляющей импеданса индуктора от его температуры θ , т.е. получение соотношения $I(\alpha, \theta)$, так как магнитная проницаемость $\mu(H)$ зависит от θ . Поэтому функцию $I(\alpha, \theta)$ сложно получить в явном виде, т.е. решить указанные уравнения аналитически. Решение системы уравнений получаем, применив численно-аналитические методы [3].

В процессе разогрева заготовки в индукторе изменение активной и реактивной составляющих нагрузки в первом приближении является скачкообразным. В этом случае, изменение параметров эквивалентной схемы описывается с помощью оператора if и подставляется в исходную систему уравнений (5):

$$f(I, R) = if(\theta > \theta_K, f_1(R_1, I_1), f_2(R_2, I_2)). \quad (12)$$

В качестве основного средства исследования электромагнитных процессов в инверторе тока выбрана программа моделирования динамических систем VisSim, демо-версия которой обеспечивает широкие возможности по

формированию, отладке и исследованию моделей сложных технических объектов различной физической природы, в том числе совместно с системами управления [6, 8]. Эта программа позволяет моделировать процессы с большим разбросом постоянных времени, т.е. системы, в которых длительность переходных процессов отличаются более чем в 10^5 раз. Визуализация результатов с возможностью их последующей обработки в постпроцессоре, транслируемость математических моделей из других математических процессоров, значительная библиотека стандартных блоков являются преимуществами данной среды моделирования.

Динамические модели систем в VisSim описываются иерархическими структурными схемами (блок-схемами), т.е. приложение является инструментальной средой визуального проектирования. Математическое обеспечение программы имеет пакет решателей интерпретирующего типа, функционирующий в динамическом режиме. В состав математического обеспечения входят явные методы численного интегрирования, итерационные методы для нахождения корней алгебраических уравнений, а также методы для параметрической оптимизации.

VisSim имеет возможности управления процессом моделирования, что заключается в свободном выборе величин локальных шагов симуляции, в программировании серии повторных симуляций, в том числе для изучения поведения модели в условиях случайных возмущений [7].

На основании приведенных выше уравнений и особенностей математического обеспечения VisSim получена математическая модель системы ПП – ИУ.

Анализ полученных временных характеристик и сопоставление их с результатами натурного эксперимента показал приемлемую точность разработанной модели как в режиме переходного процесса, так и в установившемся режиме (относительная погрешность по току 10 – 15%).

Выводы. Анализ существующих математических процессоров показал, что выход на стационарный режим силовых электронных устройств адекватно моделируется в программе VisSim. Разработанная для данного программного обеспечения модель системы ПП-ИУ сохраняет соотношение между входом и выходом системы (т.е. передаточную функцию), и в то же время позволяет перейти от одного дифференциального уравнения n -го порядка к системе n дифференциальных уравнений первого порядка. Преимущество такого представления в том, что кроме двух внешних переменных (входной и выходной), в модели отражаются и все внутренние переменные системы.

Минимальность математического описания системы обеспечивает высокую экономичность модели, а способ и вид уравнений обеспечивает универсальность модели и простоту ее адаптации для других математических процессоров.

Таким образом, разработанная модель сочетает в себе такие показатели качества, как точность, экономичность и универсальность и может быть рекомендована для исследования в задачах параметрической оптимизации инверторов тока.

Список литературы: 1. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева / *А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин.* – Л.: Энергия, 1974. – 264 с. 2. *Василенко О.В.* Моделирование систем преобразовательной техники / *А.В. Переверзев, О.В. Василенко, С.Л. Шмалый, Р.В. Прокопенко* // Техническая электродинамика. Тем. выпуск. Силовая электроника та енергоефективність. – Ч. 1. – 2003. – С. 43–48. 3. *Василенко О.В.* Усунення алгоритмічних збоїв в EСAD / *А.В. Переверзев, О.В. Василенко* // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 25–29. 4. *Переверзев А.В.* Моделирование в електроніці / *А.В. Переверзев, О.В. Василенко.* – Запоріжжя: ЗДІА, 2003. – 160 с. 5. *Семенов В.В.* Транзисторный инвертор тока с заданным коэффициентом несинусоидальности выходного напряжения / *В.В. Семенов* // Техническая электродинамика. Тем. выпуск. Силовая электроника та енергоефективність. – 2003. – С. 23–25. 6. *Макаренко М.П.* Моделирование сетевых перетворювачів енергії модуляційного типу / *М.П. Макаренко, В.І. Сенько, М.М. Юрченко.* – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2002. – 140 с. 7. *Земан С.К.* Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы индуктор – нагреваемый объект / *С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров* // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 197 – 202. 8. *Гурский Д.А.* Вычисления в MathCAD 12 / *Д.А. Гурский, Е.С. Турбина.* – СПб.: Питер, 2006. – 544 с.

Статья представлена д.т.н., проф. Пазюк М.Ю.

УДК 621.314: 621.383.52

Моделирование инвертора струму, що працює на індукційну установку / Василенко О.В., Мовенко Є.Д. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 43. – С. 34 – 41.

В статті представлена комп'ютерна модель високочастотного перетворювача енергії із ланкою підвищеної частоти, що працює на індукційну установку. Проведено аналіз математичних процесорів. Представлено систему рівнянь динамічної моделі інвертора, яка адаптована для програми WisSim. Іл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: комп'ютерна модель, перетворювач енергії, математичні процесори, система рівнянь, динамічна модель.

UDC 621.314: 621.383.52

Modeling of the inverter of current working at inuction hardening / Vasilenko O.V., Movenko E.D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – №. 43. – P. 34 – 41.

In article is presented computer model of the radio-frequency converter of energy with section of the raised frequency, working at inductor installation. The heve been analysed mathematical processors. The heve been presented the equations of inverter's dynamic model, adapted for WisSim program. Figs.: 1. Refs.: 8 titles.

Key words: computer modeling, transducer of energy, mathematical processors, system of the equations, dynamical model.