

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация. Описывается метод синтеза многофазных автономных инверторов напряжения на основе использования генетических алгоритмов. Задача синтеза решалась по критерию минимума коэффициента несинусоидальности выходного напряжения автономных инверторов напряжения со ступенчатой модуляцией. Целью работы является автоматизация процесса поиска новых схемных решений в данном классе преобразовательных устройств.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, синтез, генетический алгоритм.

Abstract. The method of synthesis of multi-phase autonomous voltage inverters is described with the help the genetic algorithms. Problem of synthesis was solved according to minimum ratio of unsmoothness of output voltage of autonomous voltage inverters with step modulation. Work's purpose is to automate of processes for the search of new circuitry of this type of converter installations.

Keywords: the autonomous voltage inverter, the synthesis, the genetic algorithm.

Введение

Интенсивно расширяющееся использование автономных инверторов напряжения (АИН) для электроснабжения потребителей с повышенными требованиями к качеству питающего напряжения, таких как радиотехнические и телемеханические системы, а также электроприводы различного назначения, требует разработки АИН с низким коэффициентом гармоник в кривой выходного напряжения. Традиционно проблема повышения качества выходного напряжения АИН решается путем использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В то же время известно, что ШИМ имеет целый ряд недостатков [1], основными из которых являются высокие динамические потери в ключевых элементах инверторов (например, IGBT-модулях) и, как следствие, завышенная установленная мощность силового оборудования.

Указанные недостатки стимулировали поиск новых схемных решений и развитие методов синтеза объектов силовой электроники. Из известных детерминированных методов наиболее пригодными для синтеза топологии АИН являются, с нашей точки зрения, методы, использующие графы изменения состояний (ГИС), и главные топологические матрицы (ГТМ) [2, 3], представляющие собой комбинаторно-топологический перебор множества вариантов синтезируемой схемы. К недостаткам данных методов можно отнести:

– отсутствие изначально заданного критерия синтеза – синтез схемы вентиля преобразователя (ВП) осуществляется путем полного перебора всех возможных схем, определяемых ГИС или ГТМ, среди которых производится поиск работоспособных схемных решений;

– невозможность в рамках теории ГИС или ГТМ синтеза алгоритма управления вентилями преобразователя – импульсы управления ключами схемы либо задаются на начальном этапе заполнения ГИС или ГТМ, либо определяются с использованием опыта исследователя на заключительном этапе синтеза.

Известно, что проблема формализованного синтеза силовой части АИН со ступенчатой модуляцией (СМ) по критерию минимума коэффициента несинусоидальности кривой напряжения и соответствующего алгоритма управления вентилями в настоящее время остается нерешенной. Решение задачи структурного синтеза АИН стало возможным благодаря появлению современных мощных компьютеров, что также дало толчок развитию теории эволюционных алгоритмов, требующих моделирования на компьютере процессов естественного отбора особей популяции.

В данной статье излагается принципиально новый подход к решению проблемы синтеза топологии АИН, основанный на использовании теории эволюционного моделирования, в частности, концепции генетических алгоритмов. В качестве критерия синтеза для данного класса устройств был выбран достаточно объективный показатель качества преобразованной электроэнергии – коэффициент несинусоидальности кривой выходного напряжения, который учитывает весь спектр высших гармоник в выходном сигнале инвертора.

1. Эволюционный метод синтеза топологии АИН

Метод представляет собой итерационный процесс, в котором особи сначала отбираются для скрещивания, потом скрещиваются, затем из их потомков формируется новое поколение. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не найдено решение или не получено достаточное к нему приближение. Именно отбор наилучших объектов подтверждает целенаправленность эволюционного метода, позволяющего уменьшить время поиска решения на несколько порядков по сравнению со случайным поиском. В отличие от традиционных методов оптимизации, эволюционные алгоритмы применяют вероятностные правила выбора и осуществляют поиск решения, исходя не из единственной точки, а из некоторой популяции. При разработке прикладных программ используют важную особенность эволюционных алгоритмов, которая заключена в их способности манипулировать одновременно многими параметрами.

Для практической реализации эволюционного алгоритма сначала необходимо выбрать подходящую структуру представления возможных решений. В постановке задачи поиска экземпляр этой структуры данных представляет точку в пространстве поиска всех возможных решений. Структура данных, или генотип, состоит из одной или большего количества хромосом. Хромосома – это некоторый числовой вектор, соответствующий подбираемому параметру. Каждая из позиций хромосомы называется геном [4].

Одно из основных понятий эволюционного метода – функция приспособленности – представляет меру приспособленности каждой особи популяции к условиям среды. В задачах оптимизации функция приспособленности принимает вид целевой функции и в зависимости от характера решаемой задачи максимизируется или минимизируется. На каждой итерации алгоритма при помощи функции приспособленности определяется приспособленность каждой особи данной популяции. Чем больше значение этой функции, тем выше «качество» хромосомы. Соответственно, при решении задачи минимизации функции ее легко можно свести к задаче максимизации.

Составной частью любого эволюционного алгоритма является стратегия отбора, которая и определяет «достоинств» для создания потомков осо-

бей. Существуют различные методы отбора. В данной работе был использован наиболее популярный так называемый метод рулетки. Каждой хромосоме сопоставляется сектор колеса рулетки, величина которого пропорциональна значению функции приспособленности данной хромосомы и выражается согласно формуле

$$p(ch_j) = \frac{F(ch_j)}{\sum_{j=1}^N F(ch_j)}, \quad (1)$$

где $F(ch_j)$ – значение функции приспособленности хромосомы ch_j . Все колесо рулетки соответствует сумме значений функции приспособленности всех хромосом популяции. Очевидно, что чем больше сектор, тем больше вероятность выбора соответствующей хромосомы.

В результате процесса отбора создается родительская популяция с численностью N , равной численности текущей популяции.

Формирование нового поколения происходит в результате применения двух основных операторов: кроссовера и мутации. В соответствии с вероятностью выполнения кроссовера из родительской популяции выбирается пара хромосом. Далее разыгрывается позиция гена, определяющая точку разрыва. Результирующая хромосома получается из начала одной и конца другой родительских хромосом. Для того чтобы наиболее полно исследовать пространство поиска и избежать схождения к локальному экстремуму, применяется оператор мутации, инициирующий разнообразие в популяции. Оператор мутации состоит в случайном изменении на противоположное значение каждого бита с определенной вероятностью.

Хромосомы, полученные применением эволюционных операторов к хромосомам родительской популяции, включаются в состав новой популяции. Она становится так называемой текущей популяцией для данной итерации эволюционного алгоритма. На каждой очередной итерации рассчитываются значения функции приспособленности для всех хромосом этой популяции, после чего проверяется условие останова алгоритма и либо фиксируется результат в виде хромосомы с наибольшим значением функции приспособленности, либо осуществляется переход к следующему шагу эволюционного алгоритма, т.е. к отбору.

Работа алгоритма может быть завершена после достижения функцией приспособленности требуемого оптимального значения. Также останов алгоритма может произойти при достижении популяцией состояния адаптации, идентифицируемого по стягиванию ядра популяции в точку, либо после выполнения заданного количества итераций.

Блок-схема эволюционного алгоритма представлена на рис. 1.

2. Процедура и результаты синтеза однофазных АИН при активной нагрузке

Перейдем к решению задачи синтеза автономных инверторов напряжения с помощью эволюционного алгоритма. Постановка задачи заключается в следующем: по заданной форме выходного напряжения инвертора и при заданной элементной базе АИН синтезировать структуру силовой схемы

преобразователя, а также алгоритм управления вентилями, причем таким образом, чтобы инвертор обеспечивал заданную форму кривой выходного напряжения.

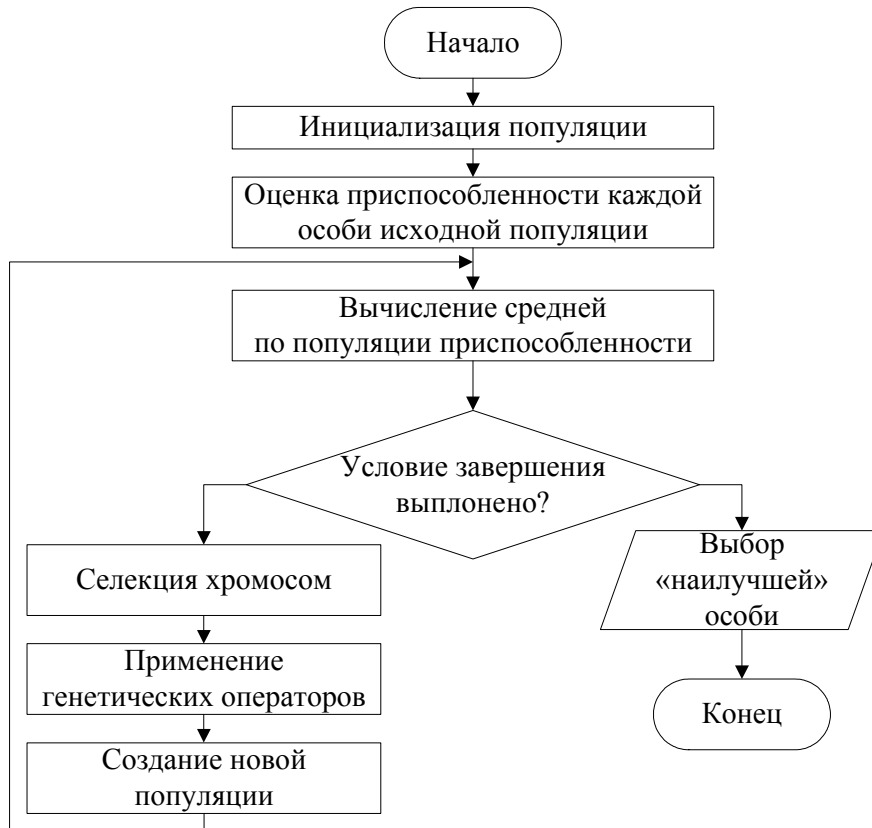


Рис. 1. Блок-схема эволюционного алгоритма

Очевидно, что прежде чем решать задачу синтеза силовой схемы АИН и алгоритма управления вентилями, необходимо рассчитать оптимальную форму выходного сигнала проектируемого инвертора. В этом случае задача ставится следующим образом: для данной N -ступенчатой кривой выходного напряжения инвертора, необходимо найти такие углы управления, при которых достигается минимум коэффициента несинусоидальности выходного напряжения. При этом уровни ступеней рассчитываются по углам управления с помощью формулы [5]

$$E_q = A(\cos \alpha - \cos \beta) / (\beta - \alpha), \quad (2)$$

где α , β – начальная и конечная точки q -й ступени выходного напряжения; A – амплитуда синусоиды, относительно которой вычисляется коэффициент несинусоидальности.

Если полученный коэффициент несинусоидальности не удовлетворяет требуемому значению, следует увеличить число ступеней и повторить процедуру.

Каждая особь популяции в данном алгоритме характеризуется одной хромосомой, гены которой представляют углы управления, а также величи-

ной коэффициента несинусоидальности выходного напряжения. Коэффициент несинусоидальности кривой выходного напряжения АИН вычисляется по следующей формуле [5]:

$$K_{нсU} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1}, \quad (3)$$

где U , U_1 – действующие значения выходного напряжения и ее основной гармоники соответственно.

Результат функционирования эволюционного алгоритма синтеза оптимальной амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) представлен на рис. 2.

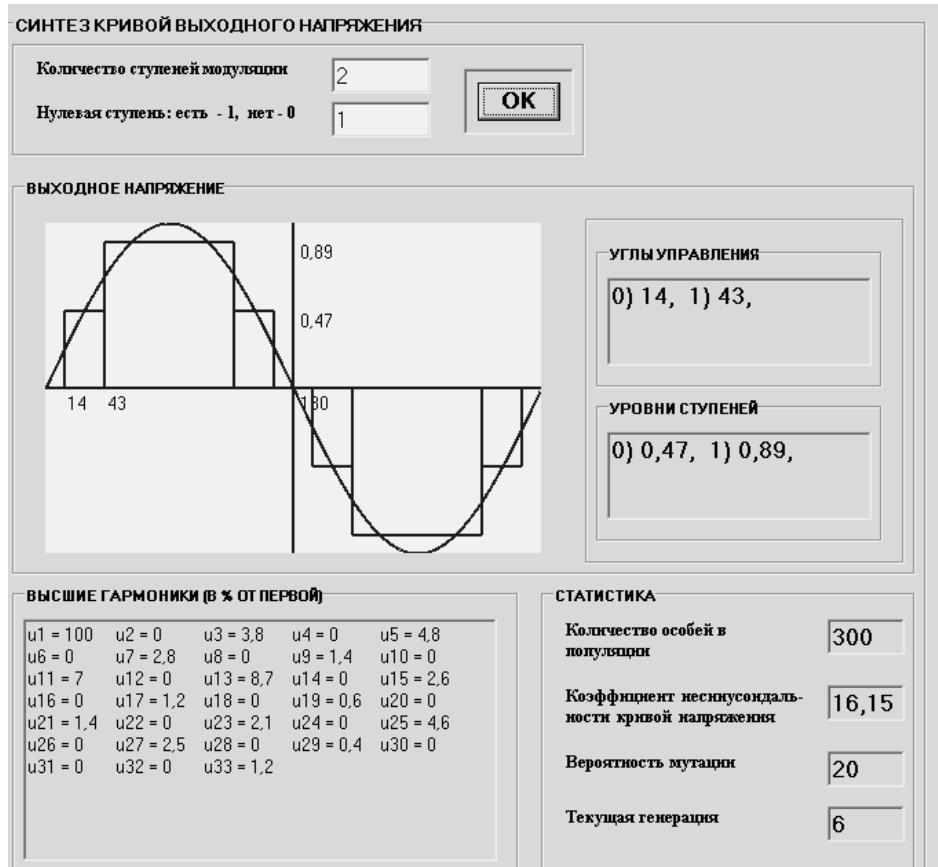


Рис. 2. Результат работы эволюционного алгоритма синтеза выходного напряжения 1-фазного АИН с 2-ступенчатой модуляцией

На рис. 2 изображена синтезированная кривая однофазного выходного напряжения АИН, указаны значения углов управления и уровней ступеней, а также получаемый при этом гармонический состав напряжения. Значения уровней ступеней кривой выходного напряжения получены в относительном виде $\frac{U}{U_1}$, где U_1 – амплитуда первой гармоники.

Однако для данных значений углов управления и уровней ступеней выходное напряжение АИН содержит гармоники, кратные трем. Следовательно,

кривая выходного сигнала инвертора не удовлетворяет требованию 3-фазной системы напряжений:

$$Un(x) + Un(x + 2\pi/3) + Un(x + 4\pi/3) \equiv 0, \forall x \in [0...2\pi/3]. \quad (4)$$

Исследования показали, что 2-ступенчатая кривая не содержит кратных трем гармоник при углах управления 15° и 45° и только тогда, когда для уровней ступеней выполняется соотношение

$$E2 = 2 \cdot E1. \quad (5)$$

Следующим этапом в решении поставленной задачи синтеза структуры силовой схемы АИН является определение исходного элементного базиса схемы. Из анализа кривой выходного напряжения следует, что в базовый набор элементов необходимо включить как минимум два источника питания с напряжением $Um/2$, диод и пять ключей, поскольку очевидно, что один из источников должен периодически как включаться, так и отключаться. В эволюционной модели полупроводниковые вентили представлены идеальными ключами, сопротивление которых в открытом состоянии равно нулю, а в закрытом – стремится к бесконечности. Коммутация ключей происходит мгновенно. Такая замена допустима, поскольку учет реальных параметров элементов не имеет значения для целей синтеза топологии схем АИН.

Особь популяции в данном случае представляет собой некоторое схемное решение поставленной задачи. При разработке эволюционного алгоритма необходимо определить и закодировать генотип особи, который должен отражать как структуру силовой схемы АИН, так и алгоритм управления вентилями. Для кодировки хромосомы силовой схемы синтезируемого инвертора каждой вершине всех ветвей присваивается уникальный номер. Данная хромосома несет в себе информацию о том, какие вершины исходных ветвей силовой схемы соединяются между собой, сколько узлов содержит силовая схема, т.е. генотип силовой схемы должен определять топологию схемы преобразователя.

Далее необходимо выбрать пространство поиска для синтезируемой силовой схемы АИН, т.е. определить, в каком классе N -узловых схем будет осуществляться поиск схемного решения. Анализ синтезированной кривой позволяет сделать следующие выводы:

1) кривая имеет периодическую двуполярную форму. Для получения такой формы необходимо менять через каждые полпериода направление приложенной к нагрузке ЭДС;

2) реализовать физически изменение полярности напряжения на нагрузке можно с помощью управляемых ключей, которые позволяют подключить источник ЭДС к нагрузке либо в одном, либо в другом направлении.

Отсюда следует, что пространством поиска структуры силовой части АИН не может служить ни класс 2-узловых схем, ни класс 3-узловых схем, поскольку для данных классов схем на нагрузке невозможно получить напряжение разной полярности. В пространстве 4-узловых схем возможно получение мостовой схемы (2 узла нагрузки и 2 узла моста) с одноуровневым выходным напряжением. Для получения 2-ступенчатой амплитудно-модулированной формы выходного напряжения (рис. 2), очевидно, необходимо

вести поиск топологии схемы, по крайней мере, в пространстве 5-узловых схем.

Определим набор генов алгоритма управления вентилями схемы. Хромосома управления будет состоять из шести генов, определяющих значения коммутационных функций всех ключей в любой момент времени на периоде функционирования АИН. Вентили Т1–Т4 находятся в проводящем состоянии только в течение какого-либо одного интервала на данном периоде. В то же время очевидно, что обеспечивающий вторую ступень выходного напряжения вентиль Т5 должен замыкаться в течение каких-либо двух интервалов на периоде выходной частоты инвертора.

Учитывая форму синтезированной кривой и в соответствии с вышесказанным, длительность проводящего состояния ключей Т1–Т4 принимаем равной $5\pi/6$, а ключа Т5 – $\pi/2$. Алгоритм управления вентилями Т1–Т4 будет кодироваться генами $G1–G4$, каждый из которых может принимать пять различных целых значений – от 0 до 4. С помощью генов Gk ($k = 1..4$) хромосомы алгоритма управления строятся соответствующие коммутационные функции $Fk(x)$ вентиляей Tk следующим образом:

$$Fk(x) = 1, \text{ при } x \in (Gk \cdot \pi/2 - 5\pi/12, Gk \cdot \pi/2 + 5\pi/12);$$

$$Fk(x) = 0 \text{ для всех остальных значений } x,$$

где $x = wt$, t – время; w – циклическая частота работы АИН; $k = 1..4$ – номер ключа.

Управление вентилем Т5 будет кодироваться двумя генами $G5$ и $G6$, каждый из которых также может принимать пять различных целых значений – от 0 до 4. Коммутационная функция для вентиля Т5 определяется следующим образом:

$$F5(x) = 1,$$

$$\text{при } x \in (G5 \cdot \pi/2 - \pi/4, G5 \cdot \pi/2 + \pi/4) \cup (G6 \cdot \pi/2 - \pi/4, G6 \cdot \pi/2 + \pi/4);$$

$$F5(x) = 0 \text{ для всех остальных значений } x.$$

Определим для заданной элементной базы ограничения, которые накладываются на особи популяции:

- силовые схемы не должны содержать петель, т.е. ветвь не может поддерживаться целиком в каком-либо из узлов хромосомы;
- необходимо исключить закорачивание источников питания каким-либо вентилем или диодом в проводящем направлении;
- ветвь нагрузки нельзя подключать параллельно с диодом и напрямую к источнику питания, так как в противном случае на нагрузке будет поддерживаться либо напряжение одной полярности, либо постоянная разность потенциалов соответственно, что неприемлемо для получения заданной кривой.

Результаты работы эволюционного алгоритма представлены на рис. 3 и 4, откуда видно, что популяция развивалась до тех пор, пока не было получено оптимальное схемное решение, обеспечивающее требуемую форму выходного сигнала, после чего эволюция особей остановилась. Структура синтезированной силовой части инвертора изображена на рис. 5.

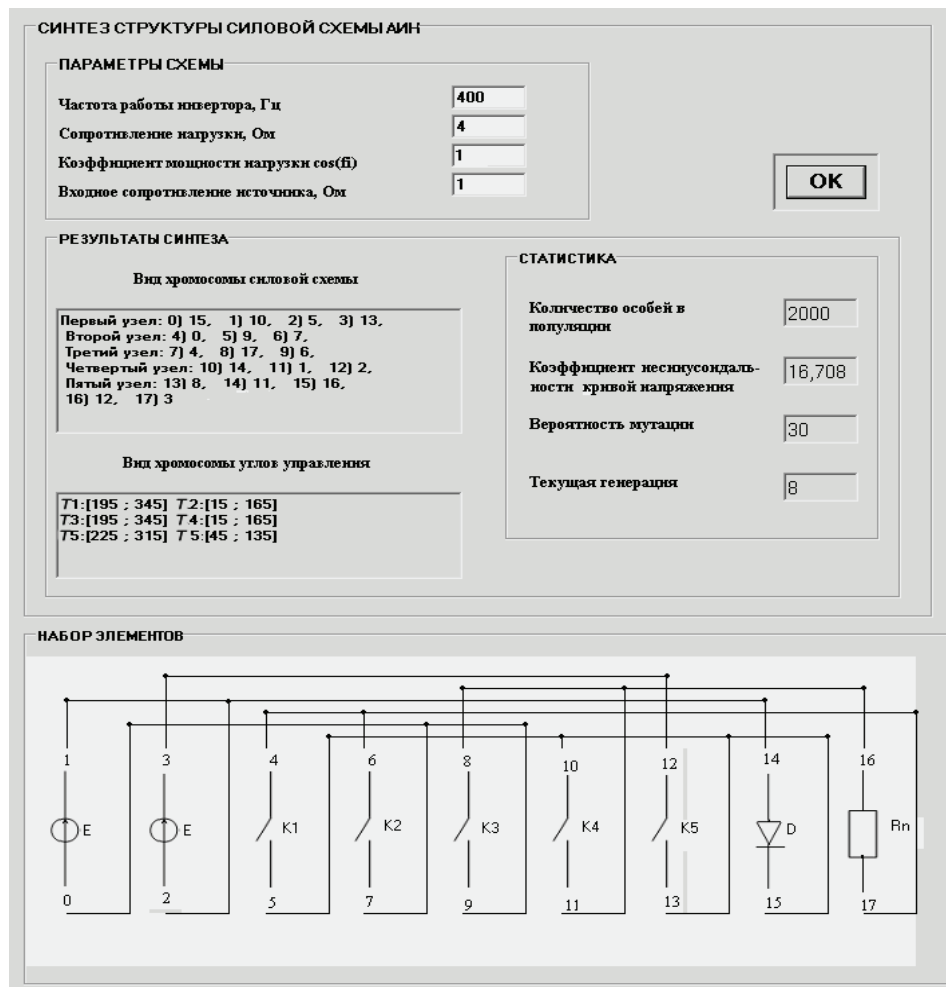


Рис. 3. Интерфейс программы, реализующей эволюционный алгоритм синтеза силовой схемы и импульсов управления вентилями 1-фазного АИН с 2-ступенчатой модуляцией

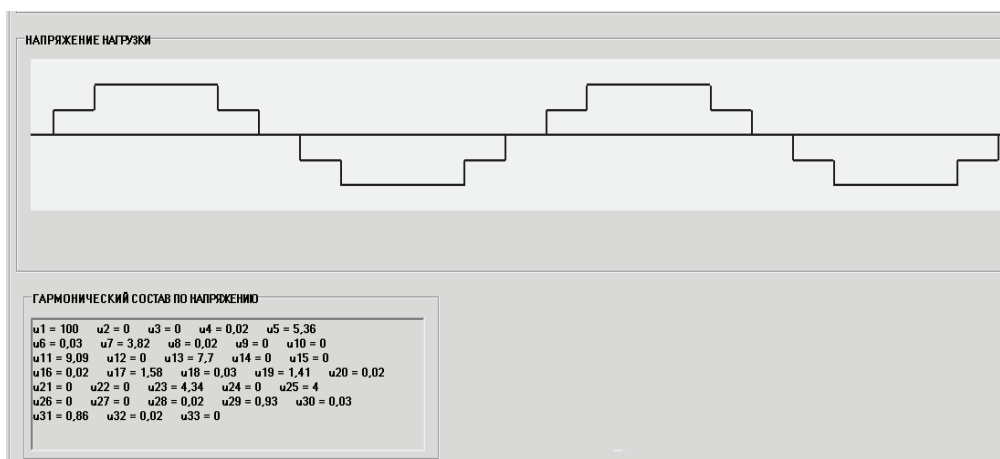


Рис. 4. Кривые выходных тока и напряжения, гармонический состав выходного напряжения синтезированного АИН

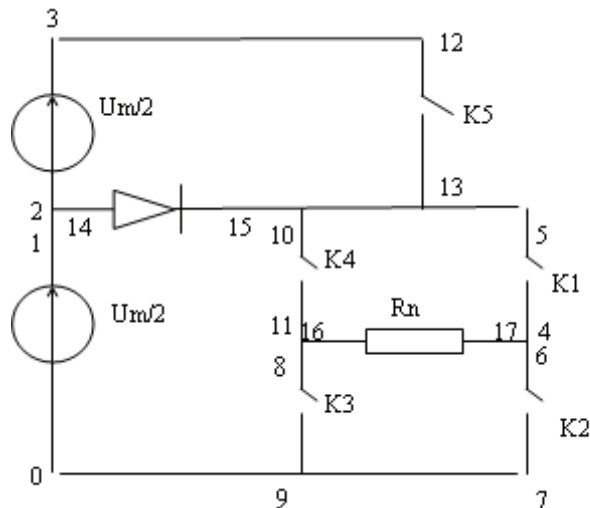


Рис. 5. Структура синтезированной силовой схемы АИН

3. Синтез однофазного АИН для активно-индуктивной нагрузки

Допустим, что необходимо синтезировать АИН, работающий на активно-индуктивную нагрузку. Данная задача имеет отличительную особенность, связанную с индуктивным характером нагрузки вентильного преобразователя. При активно-индуктивной нагрузке размыкание ключа вентильного моста недопустимо без дополнительных мер, поскольку энергия, запасенная в индуктивности, при разрыве цепи вызовет большие пики перенапряжений и сделает устройство полностью неработоспособным. Следовательно, при размыкании ключей должны быть найдены пути, по которым продолжал бы протекать ток, вызванный накопленной в индуктивности энергией. Это требование существенно изменяет схемотехнику автономного инвертора по сравнению со схемой АИН, нагруженного на активную нагрузку. Следовательно, в значительной степени должны быть расширены функции и состав генетических механизмов поиска схемных решений.

Первый этап проектирования включает в себя анализ полученной кривой выходного напряжения и определение некоторой исходной совокупности элементов, которые могут быть использованы в процессе синтеза. С целью сокращения времени поиска схемного решения, удовлетворяющего принятому критерию, процедура синтеза разбита на два этапа:

- 1) синтез топологии основного инверторного моста, обеспечивающего формирование первой ступени выходного напряжения инвертора;
- 2) развитие топологии схемы, полученной на первом этапе путем включения новых элементов, отвечающих за протекание реактивных токов нагрузки и формирование второй ступени генерируемого инвертором напряжения.

Очевидно, что состав базовых элементов, используемых алгоритмом при синтезе, должен быть расширен. В элементную базу теперь следует включить активно-индуктивную нагрузку, а также транзистор, который будет выполнять функцию направления обратного тока в цепь источника питания. После того как будет получена схема, отвечающая за формирование первой ступени кривой, алгоритм переходит к синтезу оставшейся части требуемого

схемного решения. На последующих этапах структурного синтеза некоторые позиции в генах могут быть зафиксированы, остальные позиции в генах заполняются случайным образом либо целочисленными значениями, либо нулями в случае отсутствия вершины в соединении.

Полученные в результате практической реализации эволюционного алгоритма синтеза схемы АИН для активно-индуктивной нагрузки кривые выходных тока и напряжения, а также структура силовой части инвертора, показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

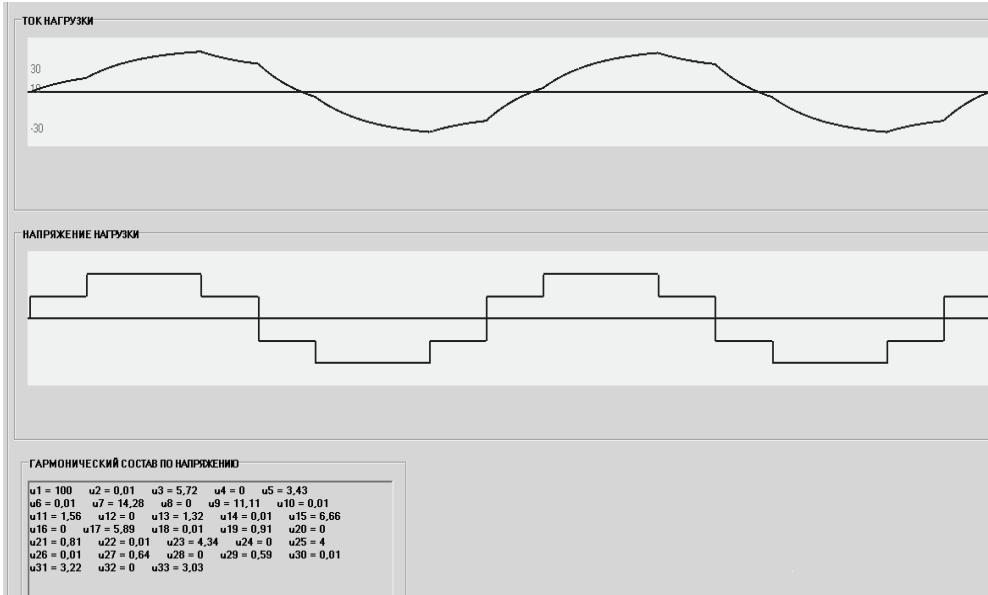


Рис. 6. Кривые выходных тока и напряжения синтезированного АИН для активно-индуктивной нагрузки

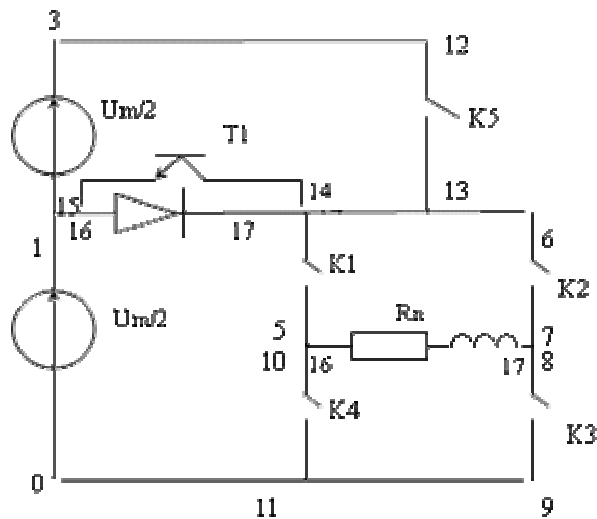


Рис. 7. Синтезированная структура силовой схемы АИН для активно-индуктивной нагрузки

Список литературы

1. **Моин, В. С.** Стабилизированные транзисторные преобразователи. Основы теории и расчета / В. С. Моин, Н. Н. Лаптев. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.
2. **Денисюк, С. П.** Применение графа изменения состояния при разработке автоматизированного синтеза схем вентильных преобразователей / С. П. Денисюк // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Радиоэлектроника. – Вып. 21. – Киев, 1984. – С. 30–35.
3. **Артеменко, М. Е.** Синтез транзисторных преобразователей напряжения на основе главной топологической матрицы / М. Е. Артеменко // Электроника и связь. – 1997. – Вып. 2. – Ч. 1. – С. 67–71.
4. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
5. **Голембиовский, Ю. М.** Оптимальный выбор уровней входных напряжений мостов в преобразовательной сети на базе инверторов напряжения / Ю. М. Голембиовский, Р. В. Колдаев // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления : межвуз. научн. сборник. – Саратов : СГТУ, 1999. – С. 12–18.

Голембиовский Юрий Мичиславович
доктор технических наук, профессор,
кафедра системотехники, Саратовский
государственный технический
университет

E-mail: mylett@list.ru

Golembiovsky Yury Michislavovich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of systems engineering,
Saratov State Technical University

Тимофеева Олеся Владимировна
ассистент, кафедра системотехники,
Саратовский государственный
технический университет

E-mail: mylett@list.ru

Timofeeva Olesya Vladimirovna
Assistant, sub-department of systems
engineering, Saratov State Technical
University

УДК 621.314.58

Голембиовский, Ю. М.

Эволюционный подход к проблеме синтеза автономных инверторов напряжения / Ю. М. Голембиовский, О. В. Тимофеева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (13). – С. 92–102.