

Определение энергетического баланса реактивных мощностей

В индукторной нагрузке тиристорного преобразователя частоты методом схемотехнического моделирования электромагнитных процессов

В статье рассматриваются особенности исследования нагрузочного контура схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ).

Юрий Зинин
umz42@mail.ru

Схемотехническая модель автономного инвертора и колебательной нагрузки

Моделирование электромагнитных процессов является необходимым этапом проектирования и исследования тиристорных преобразователей частоты. Укажем на следующий парадокс: чем проще схема ТПЧ, тем сложнее рассмотрение протекающих в ней электромагнитных процессов, поскольку элементы силовых схем выполняют множество различных функций. В этом случае для моделирования применяются программы-симуляторы, подавляющее большинство которых использует язык PSpice для

описания элементов, составляющих принципиальную электрическую схему устройства.

Ниже приведено исследование схемотехнической модели ТПЧ, выполненное в программе-симуляторе MC 10 компании Spectrum Software. Последней доступной на момент написания статьи является оценочная версия MC 10.0.1.0, которая может быть загружена из источника [1].

Преимуществом версий программы схемотехнического моделирования позволяет использовать файлы, созданные ранее [2–6]. В этой статье автор использовал разработку схемотехнической модели ТПЧ, созданную в программе MicroCap V версии 1.0.

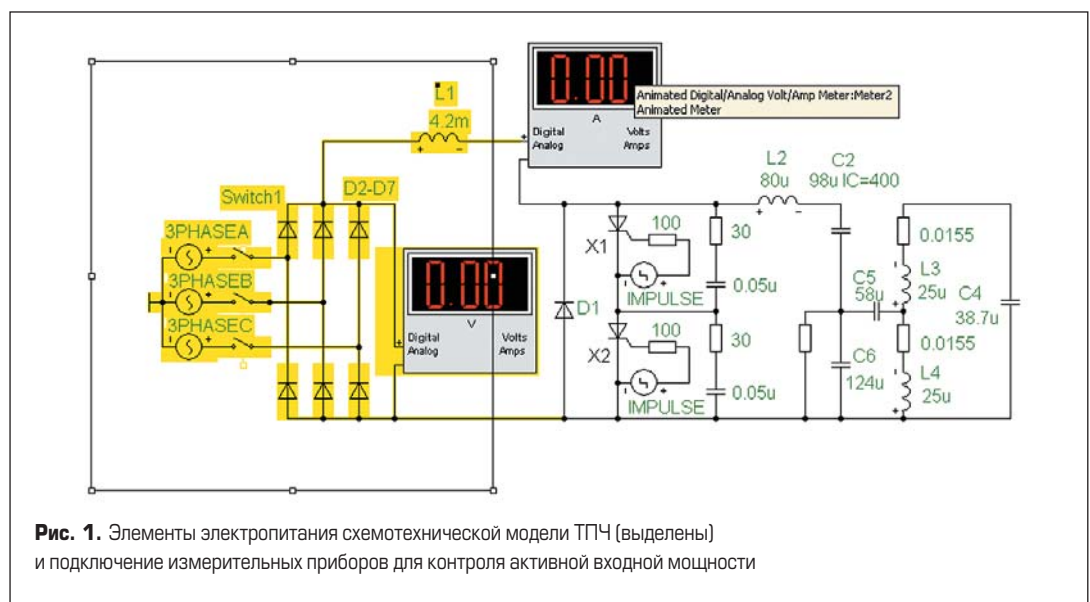


Рис. 1. Элементы электропитания схемотехнической модели ТПЧ (выделены) и подключение измерительных приборов для контроля активной входной мощности

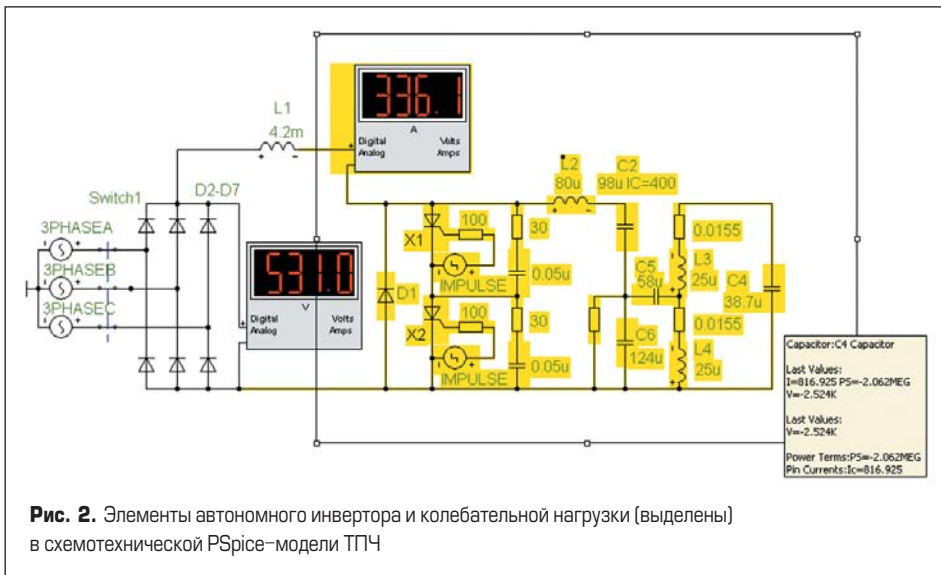


Рис. 2. Элементы автономного инвертора и колебательной нагрузки (выделены) в схематехнической PSpice-модели ТПЧ

На рис. 1 желтым цветом выделены элементы функциональных узлов схематехнической модели, которые обеспечивают электропитание ТПЧ: трехфазная сеть переменного тока промышленной частоты (PSpice-модели 3PHASEA, 3PHASEB, 3PHASEC); мостовой трехфазный выпрямитель (PSpice-описание диодов D2–D4); дроссель постоянного тока в виде линейной индуктивности ($L_1 = 4,2$ мГн) [7–10].

Анимированный контактный выключатель Switch отделяет источник питания от автономного тиристорного инвертора, при этом показаны анимированных электроизмерительных приборов — цифрового либо аналогового вольтметра и амперметра — нулевые (рис. 1).

На рис. 2, в отличие от рис. 1, выделены следующие функциональные узлы схематехнической модели: тиристоры несимметричного инвертора с обратным диодом (PSpice-модели X1, X2 и D1); контур коммутации тиристоров (L2 и C2); конденсаторы нагрузочного колебательного контура (C4, C5 и C6); компоненты индуктора (индуктивности L3 и L4 с последовательным омическим сопротивлением и отводом от средней точки).

На рис. 2 анимированный контактный выключатель Switch показан замкнутым, он подсоединил к модели автономного инвертора модель трехфазной сети питания переменным током частотой 50 Гц. Импульсы управления тиристорами инвертора (IMPULSE) подаются с необходимой частотой, которая регулируется. Нагрузочный колебательный контур с индуктором настроен на вторую гармонику выходного тока несимметричного автономного инвертора.

Также на рис. 2 отражены показания анимированных электроизмерительных приборов после завершения расчетного интервала схематехнической модели. От сети автономный инвертор потребляет только активную энергию. Входная мощность инвертора

$$PD = RMS(v(METER1)) \times i(METER2) = 150 \text{ кВт},$$

где RMS — среднеквадратичное значение, или действующая величина входной мощности.

Для этой схематехнической модели проверяется входная мощность, параметры коммутирующего контура инвертора и колебательной нагрузки. На рис. 2 показаны величины, характеризующие реактивную мощность (PS) конденсатора нагрузки и позволяющие оценить этот параметр в конце расчетного интервала.

Методы схематехнического моделирования дают возможность провести расчет электромагнитных процессов в ТПЧ с учетом их существенных особенностей. Отметим, что через неуправляемый выпрямитель ТПЧ может потреблять только активную мощность. Реактивная мощность циркулирует в автономном инверторе, вызывая «раскачку» напряжения на тиристорах и в колебательном контуре индуктора.

Схематехническая модель выполнена на основе несимметричной схемы автономного тиристорного инвертора тока. Выходной ток инвертора через коммутирующий контур (L2, C2) протекает через колебательную нагрузку с индуктором.

Рабочая частота колебательного контура нагрузки, в который включен индуктор (L3, L4), определяется как удвоенное значение частоты включения тиристоров через временной интервал, задаваемый генератором IMPULSE. Период импульсов управления тиристорами несимметричного инвертора на всех временных диаграммах составляет 635,324 мкс. На второй гармонике указанной частоты должна осуществляться полная компенсация реактивной мощности индуктора, тогда нагрузка автономного инвертора будет эквивалентна омическому сопротивлению.

Нагрузка ТПЧ в программах схематехнического моделирования может быть представлена без существенных упрощений комбинацией индуктивностей, резисторов индуктора и конденсаторами, служащими для повышения низкого коэффициента мощности индуктора [11, 12].

В статье рассмотрен наиболее общий случай подключения индуктора — по автотрансформаторной схеме с емкостным делителем

напряжения. Определение параметров индуктора, омического сопротивления и реактивной мощности конденсаторов резонансного контура нагрузки — актуальная задача проектирования индукционной нагревательной установки с питанием от ТПЧ.

Определим действующие значения реактивной мощности.

Дроссель постоянного тока автономного инвертора:

$$RMS(PS(L1)) = 278 \text{ кВт}\cdot\text{Ар.}$$

На этом этапе не учитываются потери активной энергии в реактивных элементах инвертора.

Реактивная мощность коммутирующей индуктивности:

$$RMS(PS(L2)) = 867 \text{ кВт}\cdot\text{Ар.}$$

Реактивная мощность коммутирующего конденсатора:

$$RMS(PS(C3)) = 607 \text{ кВт}\cdot\text{Ар.}$$

Схематехническая модель, показанная на рис. 2, позволяет произвести необходимые исследования электромагнитных процессов в силовой схеме ТПЧ. Опишем работу модели тиристорного несимметричного автономного инвертора тока в установившемся режиме.

На рис. 3 показаны временные диаграммы тока и напряжения на коммутирующем конденсаторе несимметричного инвертора. При анализе переходных процессов пуска схематехнической модели импульсы генераторов IMPULSE подаются на тиристоры автономного инвертора (X1 и X2), при этом предварительно заряженный (до начального напряжения $IC = 400$ В) коммутирующий конденсатор C2 через коммутирующий дроссель L2 формирует в нагрузке инвертора одну полуволну выходного тока, протекающую через тиристор (рис. 3). Когда конденсатор C2 перезарядится этим током до напряжения обратной полярности, через обратный диод (D1) начинается перезаряд этого конденсатора на исходную полярность с меньшей амплитудой, которая отражает потери активной энергии в контуре коммутации. Тиристоры и диод выключаются.

После окончания протекания указанного тока через обратный диод инвертора начинается процесс линейного восстановления напряжения на этом конденсаторе до установившейся величины, обусловленной величиной «раскачки» напряжения.

Раскачка характеризует величину установившегося напряжения на элементах автономного инвертора при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки.

Существенная нелинейность токов и напряжений на реактивных элементах автономного несимметричного инвертора затрудняет расчет их реактивной мощности, тем более удобно для этой цели использовать программу-симулятор MC 10.

Исследование схмотехнической модели инвертора

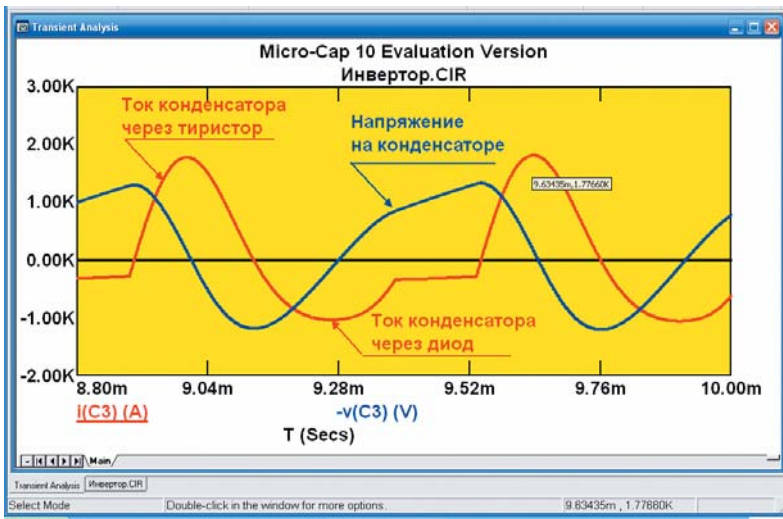


Рис. 3. Окно программы MC 10: временные диаграммы тока и напряжения на коммутирующем конденсаторе несимметричного инвертора

На рис. 4 справа показаны результаты анализа переходных процессов в дросселе постоянного тока от момента пуска автономного инвертора (вверху) и график тока в одной фазе А трехфазной питающей сети ТПЧ. В конце расчетного интервала, равного 10 мс, вольтметр показывает амплитудное значение выпрямленного напряжения, которое подается на вход автономного инвертора. Величина этого напряжения удобна для применения в силовых устройствах с использованием мощных тиристоров, которые эффективно работают в диапазоне 500–2500 Гц и выше.

Входной ток инвертора характеризуется значительными пульсациями, величина которых ограничивается динамической индуктивностью дросселя постоянного тока $L1$. Эти пульсации тока проникают в трехфазную сеть питания ТПЧ, создавая помехи другим устройствам, например, системе управления, регулирования и защиты от аварийных режимов ТПЧ.

Схему инвертора называют инвертором с закрытым входом или инвертором тока, если в ней на входе присутствует большая индуктивность.

При величине линейного напряжения 3×380 В \times 50 Гц величина максимального напряжения на выходе неуправляемого мостового выпрямителя (схемы Ларионова) составляет 531 В. Это напряжение через дроссель постоянного тока с большой индуктивностью ($L1 = 4,2$ мГн) подключается к тиристорному инвертору, обеспечивая необходимые токовые характеристики.

Особенности режимов работы дросселя постоянного тока обусловлены протеканием высокочастотных токов значительной величины. Снижение амплитуды пульсаций высокочастотных токов, генерируемых тиристорным инвертором и проникающих в питающую сеть, также является важной задачей дросселя. С этой точки зрения индуктивность дросселя постоянного тока ТПЧ должна быть насколько возможно больше, при этом возрастает запас его реактивной энергии, но в то же время увеличивается габариты и потери активной мощности.

Отметим важное обстоятельство, касающееся выбора длительности расчетного интервала при анализе электромагнитных процессов ТПЧ. Для верного отображения величины напряжения на анимированном вольтметре, которая показывается после окончания расчетного интервала, его длительность необходимо выбирать кратной множителю 10 мкс. Это объясняется особенностью формы напряжения питания автономного инвертора, подключенного к выходу мостовой схемы диодного выпрямителя.

На рис. 5 показана временная диаграмма напряжения на дросселе постоянного тока автономного инвертора с закрытым входом. Это напряжение в обратной полярности периодически прикладывается к последовательно включаемым тиристорам автономного инвертора (X1 и X2) и обратному диоду D1. Демпфирующие цепи ограничивают скорость нарастания прямого напряжения. Амплитуда напряжения определяется его длительностью

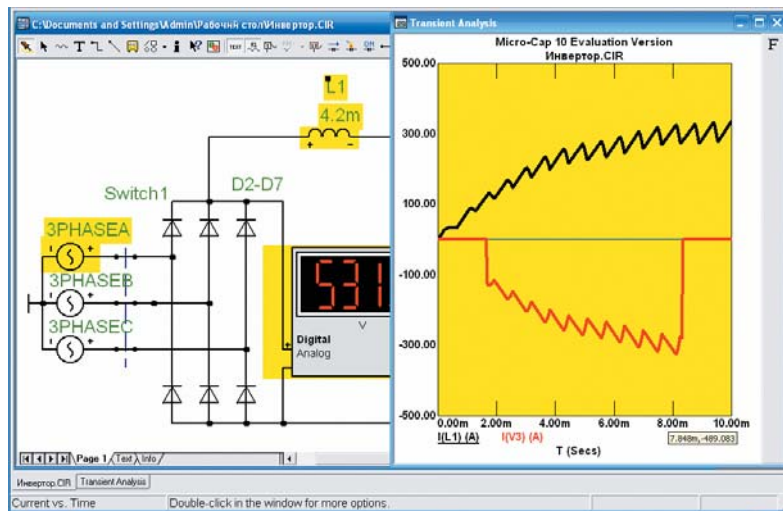


Рис. 4. Результаты анализа переходных процессов в дросселе постоянного тока от момента пуска автономного инвертора (вверху) и график тока в одной фазе питающей сети

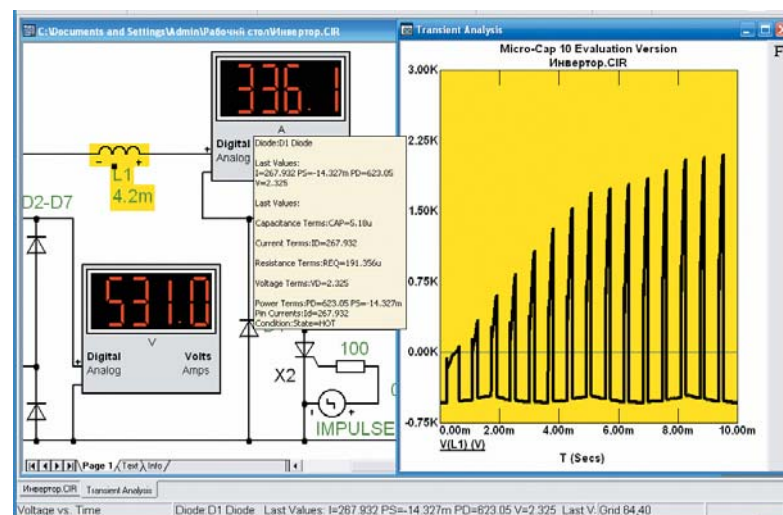


Рис. 5. Временная диаграмма напряжения на дросселе постоянного тока автономного инвертора с закрытым входом

в пределах одного периода изменения и возрастает в режимах уменьшения активного сопротивления нагрузки ТПЧ. Напряжение питания инвертора, которое показывает измерительный прибор (анимированный вольтметр), определяет величину постоянной составляющей напряжения на вентильной паре автономного инвертора. Для расчетного момента времени величину потребляемого инвертором тока показывает цифровой амперметр.

На вкладке к рис. 5 приведены рабочие режимы для обратного диода схемотехнической модели.

При подключении колебательной нагрузки электротермической установки к ТПЧ необходимо определить параметры «нагруженного» индуктора и выбрать схему подключения компенсирующих конденсаторов. Параметры нагруженного индуктора, в общем случае, определяются соответствующим расчетом.

На рис. 6 приведена временная диаграмма напряжения на конденсаторе C5 при автотрансформаторном присоединении нагрузки автономного инвертора. В статье рассмотрен наиболее общий случай подключения индуктора — по автотрансформаторной схеме с емкостным делителем напряжения. При этом нагрузка «настроена» на вторую гармонику выходного тока инвертора, это позволяет получить на выходе инвертора повышенную частоту в сравнении с частотой включения его тиристоров. В этом случае в конденсаторах нагрузочного контура появляется вторая гармоника напряжения, которая дополнительно нагружает конденсаторы, и это нельзя не учитывать при расчете реактивной мощности. Реактивная мощность для электротермических конденсаторов является параметром, определяющим их габариты, вес и стоимость.

Схемотехническое моделирование позволяет определить реактивную мощность конденсаторов при любой форме напряжения на них. На рис. 7 показано напряжение на компенсирующем конденсаторе, присоединенном к индуктору для компенсации реактивной мощности нагрузки автономного инвертора. Напряжение имеет почти синусоидальную форму с удвоенной частотой первой гармоники, что говорит о небольшой величине омического сопротивления индуктора.

На рис. 8 показана замкнутая кривая, подобная фигуре Лиссажу, для компенсирующего (C4) конденсатора нагрузочного колебательного контура, полученная для установившегося режима работы автономного инвертора, в координатах «напряжение/ток». Фигура Лиссажу — замкнутая траектория движущейся точки, совершающей одновременно установившиеся гармонические колебания в плоскости декартовых координат.

Разница диаметров полученных окружностей отражает затухание колебательного контура нагрузки, работающего на второй гармонике выходного тока автономного инвертора (3148 Гц). Нагрузочный колебательный контур можно настроить и на первую гармонику выходного тока инвертора [13–15]. Тогда для установившегося режима колебательной нагрузки большой добротности на диаграм-

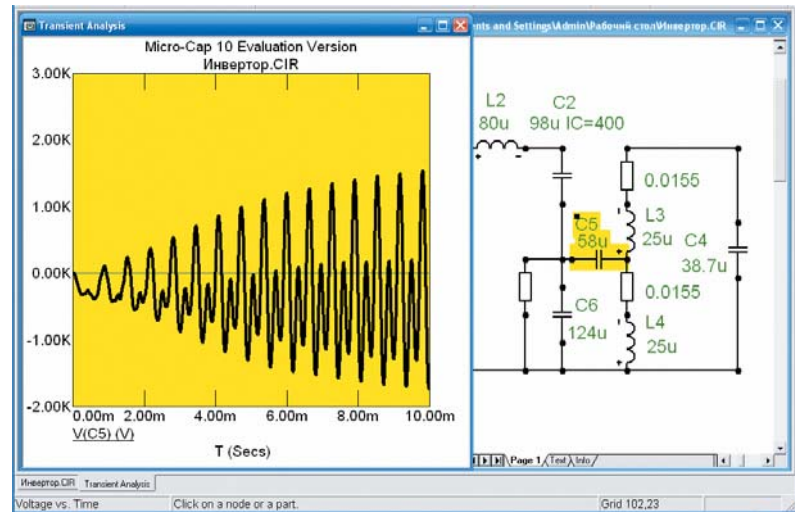


Рис. 6. Напряжение на конденсаторе при автотрансформаторном присоединении нагрузки автономного инвертора

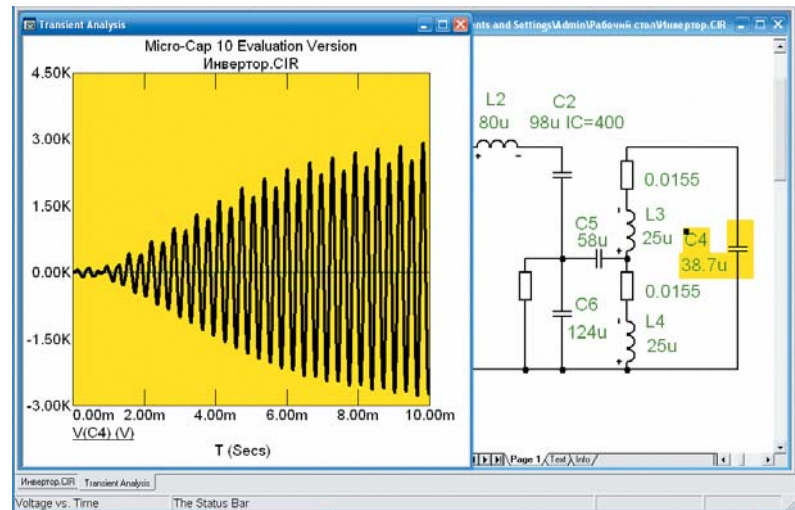


Рис. 7. Напряжение на конденсаторе, присоединенном к индуктору для компенсации реактивной мощности нагрузки автономного инвертора

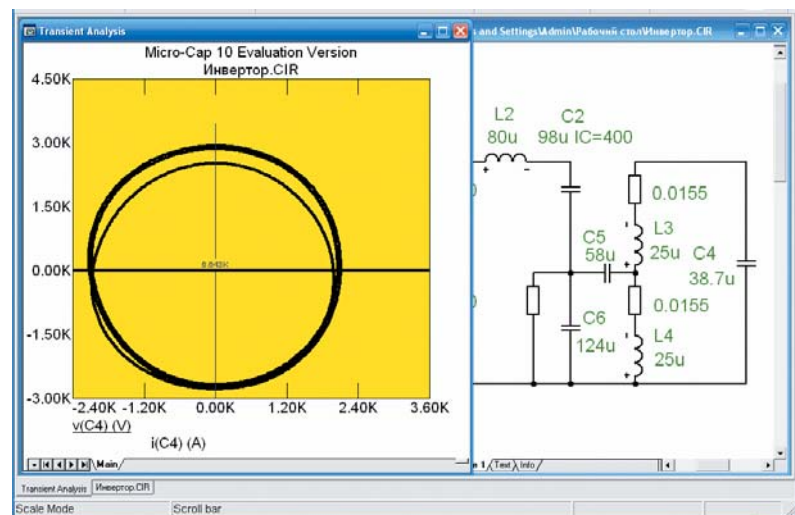


Рис. 8. Фигура Лиссажу для компенсирующего конденсатора нагрузочного колебательного контура

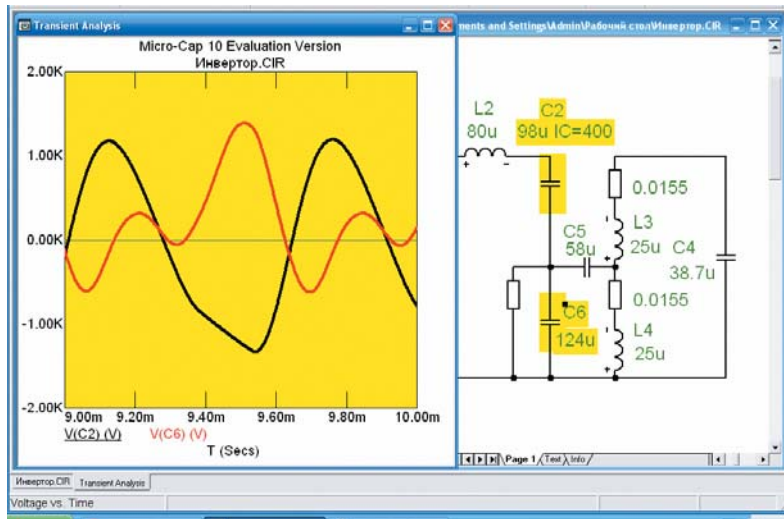


Рис. 9. Диаграммы несинусоидального напряжения на силовых конденсаторах автономного инвертора

ме получаем одну окружность, и реактивную мощность конденсатора можно рассчитать по его известным параметрам — квадрату действующего напряжения, емкости конденсатора и частоте.

На рис. 9 приведены диаграммы напряжения на силовых конденсаторах автономного инвертора для номинального режима ТПЧ. Напряжение значительно отличается от синусоидальной формы, поэтому рассчитать величину необходимой реактивной мощности затруднительно. К тому же амплитуда и форма этого напряжения меняется с регулированием частоты автономного инвертора.

Спектральный состав этих диаграмм отличается. В кривой v(C2) наибольшей является основная (первая) гармоника. В кривой v(C6) наибольшей является вторая гармоника, на которой работает колебательный контур нагрузки инвертора.

Определение действующего значения реактивной мощности элементов нагрузочного контура автономного инвертора

Реактивная мощность конденсатора — это колебательная мощность, которая приложена к конденсатору. Реактивная мощность конденсаторов рассчитывается для силовых автономных инверторов и нагрузочных колебательных контуров при синусоидальных токах и напряжениях. В нагрузочном колебательном контуре максимальное количество энергии, запасенной в конденсаторах, на рабочей частоте должно равняться энергии, запасенной в катушке индуктивности.

Для синусоидальной формы напряжения реактивная мощность, действующая в конденсаторе C, равна:

$$P_c = (U_c)^2/2 \times X_c$$

где емкостное сопротивление конденсатора: $X_c = 1/2 \pi f C$, $\pi = 3,1416$, f — рабочая частота, C — величина емкости.

Реактивная мощность, действующая в индуктивности, равна:

$$P_L = (I_L)^2/2 \times X_L$$

где индуктивное сопротивление катушки индуктивности: $X_L = 2 \pi f L$, L — величина индуктивности.

Программы схемотехнического моделирования позволяют легко определить величину реактивной мощности элементов индуктивной и емкостной нагрузки при несинусоидальных токах или напряжениях.

На рис. 10 приведены графики действующего значения реактивной мощности выходного конденсатора автономного инвертора — $RMS(PS(C3))$, реактивной мощности конденсаторов колебательной нагрузки — $RMS(PS(C4)+PS(C5)+PS(C6))$ и величины активной мощности в омическом сопротивлении индуктора ($1M = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$, RMS — среднеквадратичная величина).

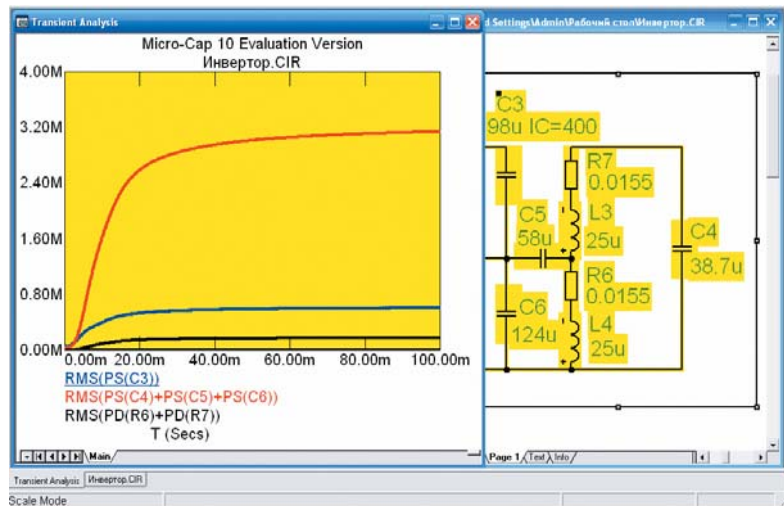


Рис. 10. Действующие значения реактивной и активной мощности в элементах нагрузки автономного инвертора

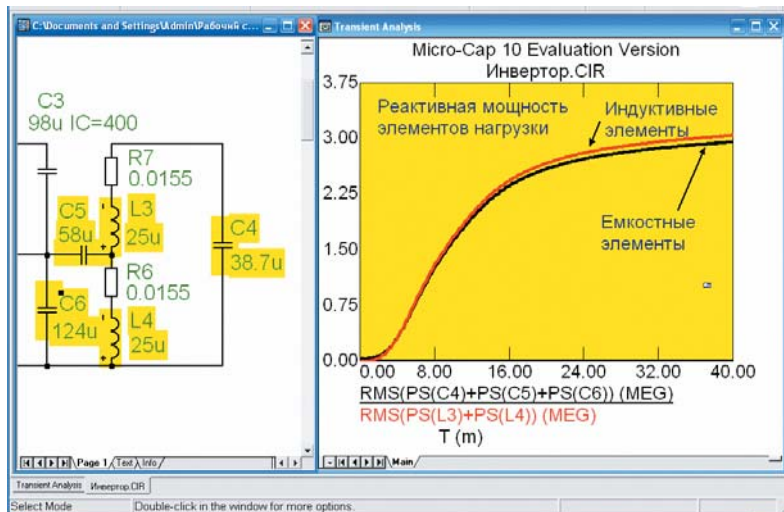


Рис. 11. Энергетический баланс реактивных мощностей скомпенсированной нагрузки ТПЧ

Графики показывают, что низкий коэффициент мощности индуктора должен компенсироваться подключением конденсаторов значительной величины. Колебательный контур нагрузки с «загруженным» индуктором обладает меньшей добротностью.

Действующее значение произведения тока на напряжение для компенсирующего конденсатора равно среднеквадратичной величине его реактивной мощности:

$$\begin{aligned} RMS(v(C4) \times i(C4)) &= \\ &= RMS(PS(C4)) = 2,3 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}. \end{aligned}$$

Емкость конденсатора С4 после определения необходимой величины округляется, после чего производится уточнение емкости других конденсаторов С5, С6 и изменение рабочей частоты автономного инвертора в небольших пределах. Схемотехническое моделирование в режиме *Probe Transient Analysis* позволяет оперативно выполнить необходимые действия.

На рис. 11 показаны кривые реактивных мощностей скомпенсированной нагрузки ТПЧ — суммарная реактивная мощность индуктивных элементов (индуктора) и реактивная мощность электротермических конденсаторов (В·Ар). Энергетический баланс рассчитанных реактивных мощностей необходим для достижения высокого коэффициента мощности эквивалентной нагрузки ТПЧ, тогда его нагрузочный контур можно представить омическим сопротивлением на этой частоте. Однако представление нагрузки омическим сопротивлением не позволяет произвести исследование частотных свойств автономного инвертора, а это основной метод регулирования рабочих режимов электротермической установки для индукционного нагрева металлов.

С целью эффективного использования электротермических конденсаторов индуктор выполнен с отводом от середины. Выявленная погрешность энергетического баланса реактивных мощностей элементов нагрузочного контура объясняется влиянием реактивных элементов автономного инвертора и не превышает 5%. Укажем, что при смене индуктора в колебательной нагрузке ТПЧ его параметры достаточно воспроизводить с такой же погрешностью. Компенсацию отклонения режима установки индукционного нагрева от номинального для ТПЧ, выполненного по приведенной схеме с постоянной величиной выпрямленного напряжения, целесообразно производить регулированием частоты инвертирования.

На рис. 12 показан общий вид батареи компенсирующих конденсаторов колебательного контура, предназначенной для повышения коэффициента мощности электротермической установки повышенной частоты и подстройки колебательного контура. В ней использованы электротермические подстроечные конденсаторы с рабочей частотой до 10 кГц и напряжением 500–800 В [16].

На табличке силовых электротермических конденсаторов типа ЭСПВ указывается его

типономинал: напряжение (0,5; 0,8; 1,0; 1,6; 2,0 кВ); частота (0,5; 1,0; 2,4; 4,0; 10 кГц); реактивная мощность (300, 650 кВ·Ар) и емкость (6–362 мкФ). Масса конденсатора 25 кг.

Для конденсаторов типа ЭЭВК тангенс угла диэлектрических потерь — $0,5; 2,0 \times 10^{-3}$, они имеют бумажно-пленочный диэлектрик. Корпус конденсатора железный (до 8 кГц) или латунный (10 кГц), корпус заземляется.

Конденсаторы электротермических установок питаются экологически безопасной жидкостью и выполняются с водяным охлаждением. Вид климатического исполнения — У3 (для умеренного климата и установки внутри помещений). Отечественные силовые конденсаторы удовлетворяют требованиям международных стандартов.

Заключение

Схемотехнические модели отдельных функциональных узлов ТПЧ — силовой трехфазной сети, диодного выпрямителя и тиристорного автономного инвертора тока с колебательной нагрузкой — позволяют моделировать переходные процессы в единой схемотехнической модели индукционного комплекса. Полученные зависимости для элементов колебательной нагрузки автономного инвертора адекватно отображают энергетический баланс реактивной мощности.

Современные программы схемотехнического моделирования, например МС 10, позволяют исследовать электромагнитные процессы в силовой схеме ТПЧ для индукционного нагрева металлов с учетом существенных особенностей представления колебательной нагрузки. В этом случае обеспечивается лучшее приближение к реальным режимам ТПЧ в сравнении с обычным представлением его нагрузки омическим сопротивлением.

Рассмотренная схема подключения колебательного контура нагрузки к тиристорному автономному инвертору является достаточно универсальной в отношении к индукторам с различными параметрами, но имеет высокие показатели по отношению активной и реактивной мощностей.

Литература

1. <http://www.spectrum-soft.com/demodownnew.shtm>.
2. Зинин Ю. Схемотехническая модель индукционного комплекса с тиристорным преобразователем частоты // Силовая электроника. 2009. № 4.
3. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.
4. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
5. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках ин-



Рис. 12. Батарея компенсирующих конденсаторов колебательного нагрузочного контура

дукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.

6. Зинин Ю. М. Методика схемотехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. Т. 6. 2005. № 2 (13).
7. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 3.
8. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
9. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
10. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
11. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
12. Абсалямов Ф. Ш., Белкин А. К., Гутин Л. И., Закиров Р. А., Шуляк А. А. Индукционные установки. М.: Энергоатомиздат. 2009.
13. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
14. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
15. Зинин Ю. М., Лобанов А. В. Система управления инверторно-индукционной установкой // Датчики и системы. 2008. № 5 (108).
16. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.