

*Канд. техн. наук, проф.. Мотченко А.И.
науч. сотруд. Саратовский Р.Н.
ст. науч. сотруд. Ушаков В.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)
канд. техн. наук Глебин А.Г.
(УИПА, горный факультет, г. Стаханов, Украина)*

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С НАГРУЗКОЙ

Розглядається принцип побудови, алгоритм роботи та практична реалізація пристроя автоматичного узгодження тиристорного перетворювача частоти з навантаженням, який дозволяє стабілізувати номінальну потужність перетворювача при незмінній його частоті керування протягом періоду плавки металу в індукційній плавильній печі.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В настоящее время для питания электротехнологических установок напряжением повышенной частоты мощностью от десятка до сотен кВт используются тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), выполненные на основе схемы резонансного инвертора удвоения частоты с диодами встречного тока [1]. Работа ТПЧ зачастую характеризуется резкой зависимостью энергетического и коммутационного режимов инвертора от изменения эквивалентных электрических параметров электротермической нагрузки в ходе технологического процесса в широком диапазоне, что особенно свойственно для индукционных плавильных печей (ИПП). Это связано с температурными изменениями сопротивления металлов, их магнитных свойств, геометрии шихты, что необходимо учитывать в схемах замещения таких нагрузок при анализе электромагнитных процессов в ТПЧ. Обычно схема замещения ИПП представляет собой последовательное соединение активного и реактивного сопротивлений, которая адекватно отражает процессы передачи электрической энергии. Нагрузкой ТПЧ является нагрузочный колебательный контур (НК), состоящий из ИПП с нагреваемым телом и компенсирующей конденсаторной батареей. Поэтому возникает необходимость непрерывного согласования инвертора с нагрузкой при изменении её параметров за период индукционного нагрева. Такое согласование позволяет получить оптимальный режим работы ТПЧ и повысить надёжность электротер-

мической установки в целом. Для этого в состав установок индукционной плавки металлов вводят специальное устройство согласования (УС) ТПЧ с ИПП. Особенность оптимального режима работы ТПЧ заключается в том, что значения параметров ИПП, резонансной частоты НК и рабочей частоты ТПЧ должны быть согласованы, что обеспечивает приемлемые электромагнитные процессы в преобразователе, необходимую мощность, передаваемую в ИПП, и максимальное использование установленной мощности ТПЧ. Проблема согласования ТПЧ с ИПП является особенно актуальной для установок индукционной плавки ферромагнитных металлов, характеризующихся значительным изменением эквивалентных параметров ИПП за период плавки.

Анализ исследований и публикаций. Существующие способы и УС ТПЧ с нагрузкой, обеспечивают согласование за счёт управляющего воздействия на систему управления (СУ) ТПЧ или применение схемных решений, приводящих к улучшению использования установленной мощности преобразователя, стабилизации генерируемой им мощности и величин, определяющих его коммутационную устойчивость при изменении параметров нагрузки [2 - 4]. В работе [2] рассмотрен экстремальный регулятор, позволяющий за счёт автоматического регулирования рабочей частоты резонансного инвертора повысить передачу энергии в ИПП. Применение такого регулятора увеличивает производительность ТПЧ с ИПП, однако не создаёт условий для полного использования установленной мощности преобразователя в течение всего цикла нагрева при изменяющихся параметрах ИПП. В работе [3] выполнен анализ схем согласования ТПЧ с нагрузкой, но не даны рекомендации для определения значений реактивных элементов схем и алгоритмов регулирования этих элементов. В работе [4, 5] рассмотрено УС ТПЧ с нагрузкой, которое обеспечивает стабилизацию номинальной мощности ТПЧ на протяжении периода плавки металла в ИПП. Согласование таким устройством осуществляется за счёт автоматического управления двумя регулируемыми индуктивностями (РИ), значения которых должны изменяться определённым образом при изменении параметров ИПП на протяжении периода плавки. Сущность регулирования заключается в поддержании неизменными за период плавки эквивалентного активного сопротивления НК (R_{Σ}) и его резонансной частоты (ω_p) на заданном уровне.

Целью настоящей работы является разработка принципа построения и практическая реализация устройства автоматического согласования ТПЧ [4], выполненного на основе схемы резонансного инвертора удвоения частоты с диодами встречного тока, с ИПП и его СУ, а также разработка алгоритма автоматического регулирования параметров УС для оптимизации электроэнергетических режимов технологических установок индукционной плавки металлов.

Изложение материала и его результаты. Для обеспечения высокого к.п.д. ТПЧ и УС, а также для эффективной передачи мощности в ИПП с относительно невысокой её добротностью, РИ необходимо выполнять с максимально возможной высокой добротностью. РИ, как вариант могут быть реализованы на основе управляемого дросселя насыщения (рис.1), в котором минимальные значения индуктивностей достигается при управляющих сигналах $U1y(t)$ и $U2y(t)$ с максимальным током подмагничивания, а максимальные – при минимальном токе подмагничивания.

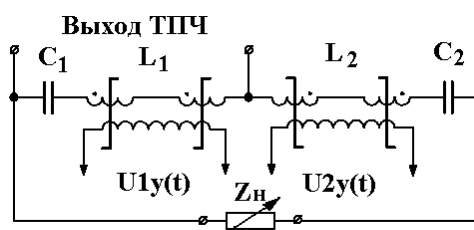


Рисунок 1 – Устройство автоматического согласования ТПЧ с нагрузкой

Катушки L_1 и L_2 этого УС выполняются из водоохлаждаемой медной трубки с толщиной стенки, превышающей глубину проникновения тока в медь в 1,5 – 2 раза. Такие решения позволяют создать высокодобротные РИ с допустимыми потерями, соизмеримыми с потерями в соединительных проводах, конденсаторах и вентильных элементах.

Как показано в работе [4] значения РИ определяются необходимыми значениями НК $R_{\text{Э}}$ и ω_p . В рассматриваемом в этой работе УС ТПЧ с ИПП в диапазоне изменения параметров ИПП требуемые расчётные изменения РИ должны составлять: для L_1 от 7,2 до 17,5 мкГн и для L_2 – от 7,6 до 11 мкГн. Расчёт значений РИ выполнен для ТПЧ мощностью $P_d = 200$ кВт с номинальной частотой $f = 2400$ Гц при питании инвертора от источника ЭДС $E_d = 500$ В. Как следует из работы [6] РИ L_1 должна использоваться для настройки на ω_p , а РИ L_2 должна выполняться настройка на заданное $R_{\text{Э}}$.

Одновременная настройка НК на необходимые значения $\omega = \omega_p$, $R_{\text{Э}} = R_{\text{Эном}}$ усложняется тем, что изменение одной из РИ L_1 или L_2 , приводит к обоюдному изменению значений ω и $R_{\text{Э}}$. Следовательно, настройка НК возможна только за счёт последовательного ограниченного изменения в необходимую сторону значения РИ. Принцип предлагаемой настройки заключается в том, что сначала, после пуска ТПЧ, контур плавно настраивается РИ L_1 на ω_p , оценивается и фиксируется значение мощности ТПЧ, после чего осуществляется изменение значения РИ L_2 на величину ΔL_2 , что приводит вновь к расстроенному НК. Далее снова осуществляется плавная настройка РИ L_1 на ω_p , вновь оценивает-

ся и фиксируется значение изменённой мощности. После этого сравниваются значения предыдущей и полученной зафиксированных мощностей, по результату которого устанавливается дальнейшее направление изменения РИ L_2 на величину $\pm\Delta L_2$ и т.д. Так как процесс стабилизации номинальной мощности осуществляется при настроенном на ω_p НК, то поддержание фазового сдвига между основными гармоническими составляющими выходного тока инвертора $I_{ВЫХ}$ и напряжением на НК $U_{ВЫХ}$ равным нулю является основным требованием для настройки НК.

Предлагаемая СУ УС строится по принципу поочередного регулирования L_1 и L_2 для достижения настройки НК на необходимые значения $R_{Э}$ и ω_p и использования принципа экстремального регулирования [2], отличающегося тем, что в качестве регулируемой переменной является не рабочая частота ТПЧ, а значение РИ L_2 . В качестве информационного входного сигнала (ИС) в СУ используется сигнал, пропорциональный входному току инвертора I_d , определяющего мощность ТПЧ, а выходные её управляющие сигналы $U1_{У}(t)$ и $U2_{У}(t)$ пропорциональны значениям РИ L_1 и L_2 .

На рис. 2 представлена функциональная схема ТПЧ с рассматриваемым устройством автоматического согласования и его СУ.

Предложен следующий алгоритм, поясняемый на поведении системы для трёх характерных временных этапах, рис.3: 1 – пуск ТПЧ и выход системы на экстремальный режим работы $t_1 - t_8$; 2 - поведение системы при неизменных параметрах нагрузки $t_8 - t_{11}$; 3 - самонастройка системы за период $t_{11} - t_{13}$ при изменении нагрузки в период $t_{11} - t_{12}$, что подтверждается компьютерным моделированием в среде ПАКЛС [7].

Рассмотрим первый этап работы ТПЧ. В момент времени t_0 ТПЧ отключен, входной ток I_d отсутствует и ИС $U(t)$, поступающий с датчика среднего значения входного тока (ДТ) в СУ, равен нулю. При подаче питания в СУ узлом установки начальных условий (УНУ) осуществляется первоначальная запись данных об ИС $U(t_0)$ в устройства выборки и хранения информации (УВХ1 и УВХ2), в результате чего на их выходах фиксируются уровни напряжения $U_1(t_0)$ и $U_2(t_0)$. Одновременно, УНУ устанавливает начальное напряжение $U_0(t_0)$ в предварительный усилитель (ПУ1), который формирует сигнал $U1(t_0)$ для устройства управления РИ L_1 (УУИ1), а УУИ1 в свою очередь управляющее напряжение $U1_{У}(t_0)$ соответствующее её минимальному значению, а также производит установку в начальное состояние двоичного реверсивного счетчика (РС), выходной цифровой код которого цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) преобразуется в напряжение $U_{ЦАП}(t_0)$ для ПУ2. ПУ2 формирует сигнал $U2(t_0)$, а УУИ2 управляющее напряжение $U2_{У}(t_0)$, соответствующее также минимальному значению РИ L_2 . В дальнейшем УНУ не оказывает влияния на работу СУ. Таким образом, произойдёт

запуск ТПЧ с НК, характеризующимся индуктивной реакцией и $R_{\Sigma} < R_{\Sigma ном}$.

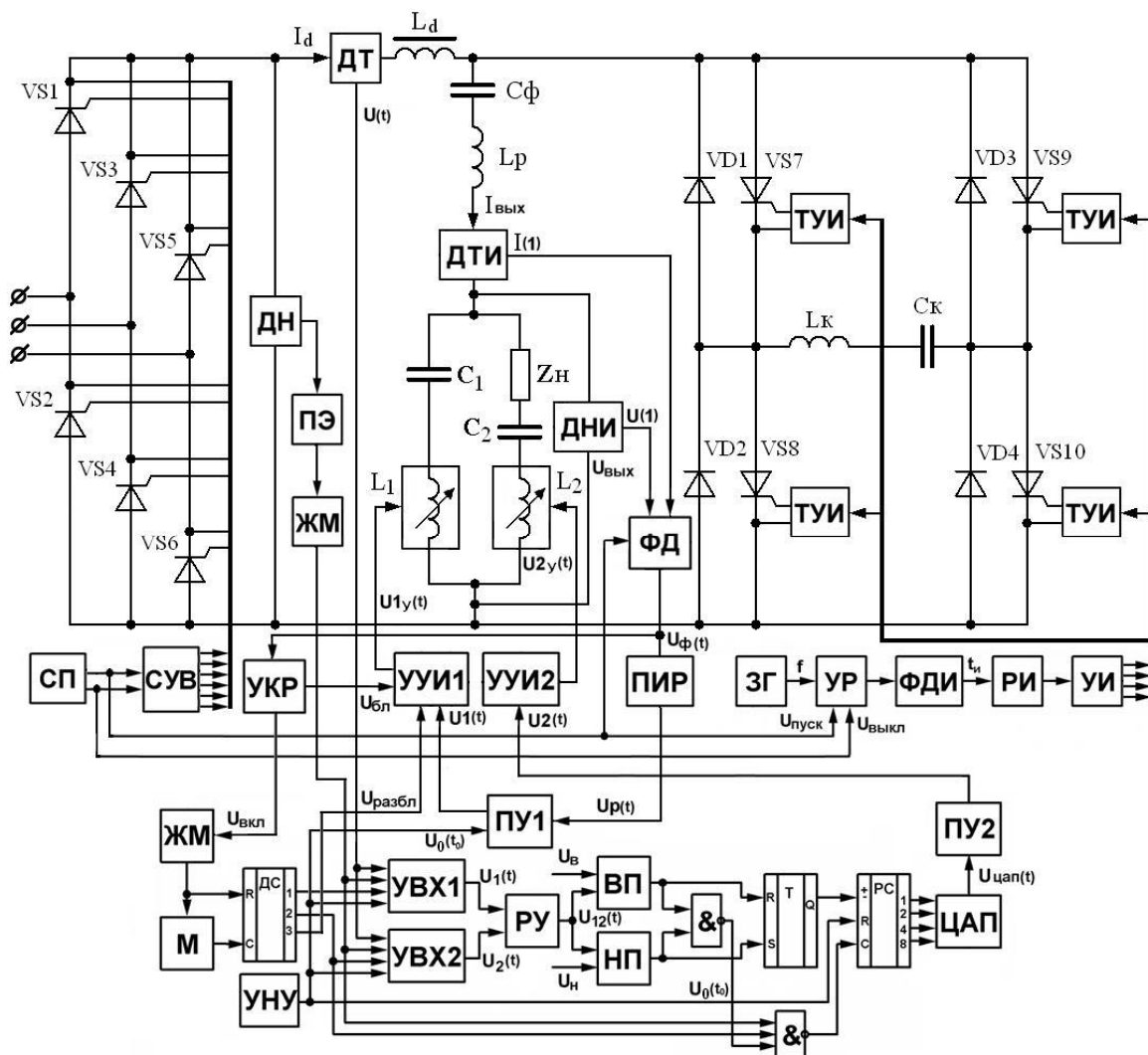


Рисунок 2 – Функциональная схема ТПЧ с УС и его СУ

В момент времени t_1 включается ТПЧ, появляется некоторый минимальный входной ток I_d и от ДТ в СУ поступает ИС $U(t_1)$. Поскольку при включении ТПЧ значения РИ минимальны, то резонансная частота НК будет выше рабочей частоты ТПЧ, что характеризуется фазовым сдвигом между $I_{ВЫХ}$ и $U_{ВЫХ}$. Одновременно на выходе датчиков выходного тока инвертора (ДТИ) и выходного напряжения (ДНИ) выделяются первые гармоники $I(1)$ и $U(1)$ соответствующие этим сигналам. Отфильтрованные сигналы $I(1)$ и $U(1)$ поступают в СУ на фазовый дискриминатор (ФД), в результате чего на его выходе появится сигнал, пропорциональный фазовому сдвигу. Если резонансная частота НК будет выше рабочей частоты ТПЧ, т.е. напряжение опережает ток на определён-

ный угол, то этому соответствует импульсное положительное значение напряжения на выходе ФД, длительность импульсов которого, пропорциональна фазовому сдвигу, а в случае отставания – отрицательное.

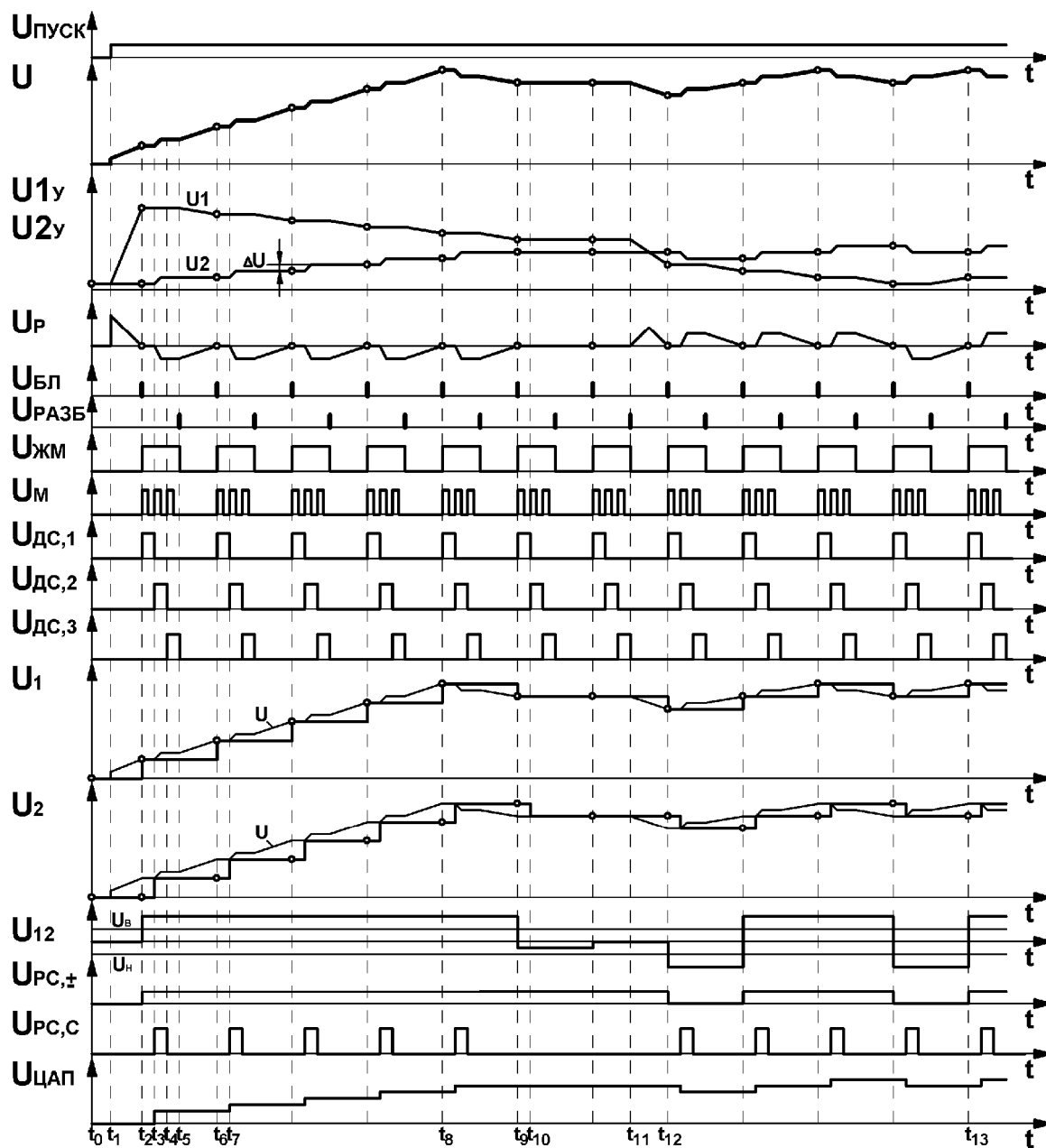


Рисунок 3 – Временные диаграммы, поясняющие принцип работы СУ

Если ток и напряжение совпадают по фазе, то напряжение на выходе ФД будет равно нулю, что соответствует резонансной настройке НК (рис.4).

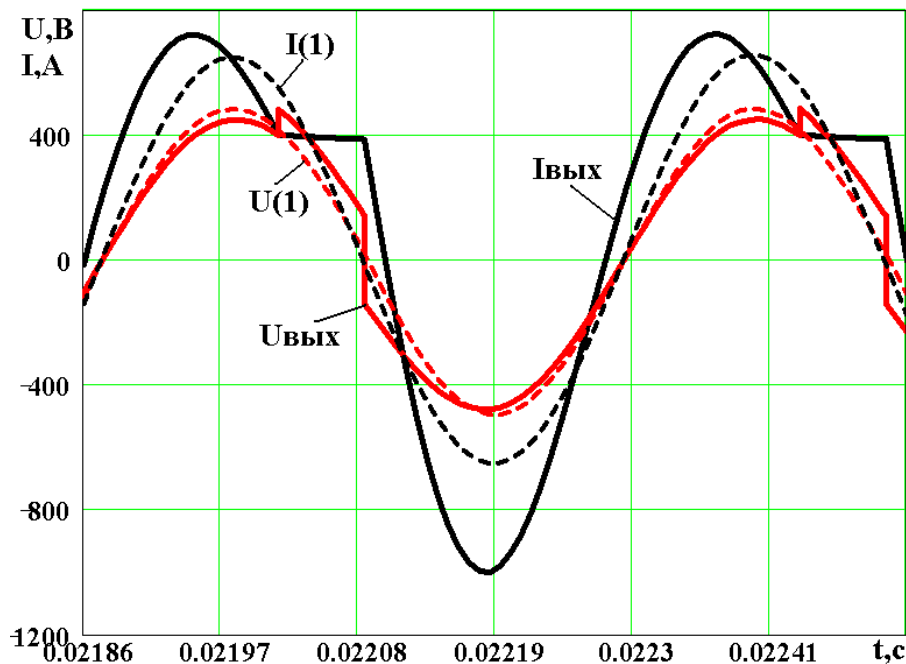


Рисунок 4 – Временные диаграммы при резонансной настройке НК

Напряжение с выхода ФД поступает на узел контроля резонанса (УКР) и одновременно преобразуется пропорционально-интегральным регулятором (ПИР) в напряжение $U_P(t)$ для ПУ1 с полярностью и значением, которые соответствуют значению фазового сдвига, а затем с помощью ПУ1 и УУ1 в соответствующий управляющий сигнал $U_{1Y}(t)$. Изменением РИ L_1 происходит настройка НК на резонанс. Как только достигается резонанс, в момент времени t_2 , УКР сигналом $U_{БЛ}$ блокирует изменение РИ L_1 и её значение остаётся неизменным при последующем возможном изменении РИ L_2 . Одновременно в момент времени t_2 сигналом $U_{ВКЛ}$ запускается ждущий мультивибратор (ЖМ) и синхронно с ним мультивибратор (М). В результате на трёх выходах десятичного счётчика с дешифратором (ДС), формируются импульсы (рис.2). Одновременно в момент времени t_2 в УВХ1 происходит перезапись величины $U_1(t_0)$ на $U_1(t_2)$, а в момент времени t_3 , в УВХ2 происходит перезапись величины $U_2(t_0)$ на $U_2(t_3)=U_1(t_2)$. На интервале времени $t_2 - t_3$, разностным усилителем (РУ), с коэффициентом усиления K , происходит сравнение только что запомненного напряжения $U_1(t_2)$ в УВХ1 с ранее запомненным напряжением $U_2(t_0)$ в УВХ2. В результате на выходе РУ появляется разностный сигнал $U_{12}(t)$, определяемый выражением

$$U_{12}(t) = K \cdot (U_1(t_n) - U_2(t_{n-1})) \quad (1)$$

От величины и знака сигнала $U_{12}(t)$ зависит, как поведет себя СУ после этого сравнения. Если значение сигнала $U_{12}(t)$ окажется при сравнении положительным или отрицательным, то произойдет предварительная подготовка для соответствующего увеличения или уменьшения управляющего сигнала $U_{2y}(t)$ на величину ΔU_2 , а соответственно для увеличения или уменьшения значения L_2 на ΔL_2 .

Поскольку на начальном цикле сравнения $U_1(t_2) > U_2(t_0)$, то $U_{12}(t)$ будет положительным, благодаря чему с момента времени t_3 произойдет увеличение управляющего сигнала $U_{2y}(t_0)$ на величину ΔU_2 , в результате на выходе СУ в момент времени t_4 будет сформирован сигнал $U_{2y}(t_4)$, напряжение которого больше напряжения сигнала $U_{2y}(t_0)$. В свою очередь это приведет к росту значения РИ L_2 на величину ΔL_2 , а, следовательно, к появлению фазового сдвига. В момент времени t_5 УКР сигналом $U_{РАЗБЛ}$ снимает блокировку изменения РИ L_1 и на интервале времени $t_5 - t_6$ происходит корректировка фазового угла с помощью изменения РИ L_1 .

В момент времени t_6 вновь наступает резонанс НК, УКР вновь блокирует изменение РИ L_1 , в УВХ1 происходит перезапись величины $U_1(t_2)$ на $U_1(t_6)$, а в момент времени t_7 в УВХ2 происходит перезапись величины $U_2(t_3)$ на $U_2(t_7)=U_1(t_6)$.

На интервале времени $t_6 - t_7$ РУ осуществляется сравнение только что запомненного напряжения $U_1(t_6)$ в УВХ1 с ранее запомненным $U_2(t_3)$ в УВХ2. На этом этапе сравнения $U_1(t_6)$ вновь становится больше $U_2(t_3)$, и величина $U_{12}(t)$ будет положительной, и с момента времени t_7 увеличивается напряжение сигнала $U_{2y}(t_4)$ на ΔU_2 . В результате на выходе СУ в момент времени t_7 формируется управляющий сигнал $U_{2y}(t_7)$ с напряжением больше напряжения сигнала $U_{2y}(t_4)$, что в свою очередь приводит вновь к росту величины РИ L_2 на ΔL_2 . Увеличение сигнала $U_{2y}(t)$ на ΔU_2 , а, следовательно, и величины РИ L_2 на ΔL_2 , будет происходить до тех пор, пока будет выполняться условие $U_{12}(t)/K > U_B$.

Как только обнаружится экстремум (максимум) входного тока инвертора, т.е. величина $U_{12}(t)/K$ станет меньше U_H , произойдет уменьшение напряжения сигнала $U_{2y}(t)$ на величину ΔU_2 (момент времени t_8), а соответственно и уменьшение значения РИ L_2 на величину ΔL_2 (до предыдущего состояния). В результате вновь появится фазовый сдвиг и СУ скорректирует значение РИ L_1 до предыдущего значения, соответствующего резонансу (момент времени t_9), а, следовательно, вновь будет достигнут экстремум входного тока.

На этапе прохождения экстремума (максимума) входного тока инвертора (момент времени t_8) или на этапе работы ТПЧ при неизменных параметрах нагрузки величина напряжения $U_{12}(t)$ становится меньше U_B , но больше U_H , т.е. значение приращения тока попадает в зону

нечувствительности (момент времени t_9). Это свидетельствует о том, что за это время не произошло существенно допустимого изменения входного тока, а направление изменения РИ L_2 и её значение останутся неизменными. Система будет находиться в этом состоянии до тех пор, пока не произойдет существенное изменение параметров нагрузки.

Как только в процессе плавки изменятся параметры ИПП (момент времени t_{11}), то изменится и режим работы ТПЧ, ФД и ПИР сразу же отреагируют на это изменение и настроят L_1 таким образом, что уже при новых параметрах ИПП вновь будет достигнут резонанс НК (момент времени t_{12}). Дальнейший поиск и выход на экстремальный режим (до момента времени t_{13}) будет осуществляться по описанному выше алгоритму.

При питании ТПЧ от промышленной сети, в последней возможны колебания напряжения, которые приводят к реакции СУ, вызванной изменением входного тока инвертора, тока и напряжения НК. Резкое изменение напряжения питания воспринимается СУ как изменение мощности, связанное с изменением параметров нагрузки. Это приводит к ненужным корректировкам значений индуктивностей. Для ликвидации таких возможных реакций в схеме СУ предусмотрен узел контроля сетевого напряжения, позволяющий игнорировать возмущения, связанные с колебаниями питающего ТПЧ напряжения, оставляя неизменными значения индуктивностей во время колебания напряжения. Данный узел состоит из датчика постоянного напряжения (ДН), порогового элемента (ПЭ), который реагирует на превышении допустимого уровня и запускает ЖМ, а он блокирует УВХ1 и УВХ2 и тактовый вход РС. По окончании работы ЖМ возобновляется поиск экстремума.

Выводы. Разработанные принцип построения устройства автоматического согласования ТПЧ с нагрузкой, алгоритм управления этим устройством и способ его реализации позволяют автоматически настраивать НК ТПЧ на заданный режим работы, обеспечить непрерывный поиск и стабилизацию максимальной мощности преобразователя при его неизменной рабочей частоте в процессе нагрева и плавки металлов.

Применение данного способа согласования обеспечивает наилучшее использование ТПЧ, снижает время плавки, повышает производительность плавильной установки и её термический КПД, а также повышает технико-экономические показатели процесса плавки металлов в ИПП.

Рассматривается принцип построения, алгоритм работы и практическая реализация устройства автоматического согласования тиристорного преобразователя частоты с нагрузкой, позволяющее

стабилизировать номинальную мощность преобразователя при постоянной его частоте управления на протяжении периода плавки металла в индукционной плавильной печи.

Principle of construction, algorithm of work and practical realization of device automatic concordance of thyristor converter of the frequency, is examined with loading, allowing to stabilize nominal power converter at unchanging his frequency of management during the period melting of metal in induction smelting furnace.

Библиографический список.

1. Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Иоффе Ю.С., Моргун В.В. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Лен. отд-ние. – 1983. – 208 с.
2. Саратовский Р.Н., Глебин А.Г., Ушаков В.И. Экстремальный регулятор для управления тиристорным преобразователем частоты при плавке металлов в индукционной печи // *Электротехніка та електроенергетика*. – Запоріжжя: ЗНТУ - 2004. – №2. – С. 55 – 60.
3. Гусев Ю.М., Белкин А.К., Шуляк А.А., Рогинская Л.Э. / Согласование тиристорного преобразователя частоты с нагрузкой. // *Технічна електродинаміка*. – Спец. випуск 1998, №2, Т2. - С. 23-26.
4. Саратовский Р.Н., Глебин А.Г., Ушаков В.И. Устройство согласования тиристорных преобразователей частоты с индукционной плавильной печью // *Техн. електродинаміка*. – 2005. – №3. – С. 55 – 60.
5. Деклараційний патент на корисну модель №10798. Послідовний резонансний інвертор / Саратовський Р.М., Глебін А.Г., Ушаков В.І. № и 2005 06350; Заявл. 29.06.2005; Опубл. 15.11.2005р. Бюл.№11. – 4 с.
6. Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Баранов А.Н., Глебин А.Г. / Система управления устройством согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной плавильной печью // *Техн. електродинаміка*. – 2006. – №4.
7. Васильев А.С., Дзлийев С.В., Федосин С.А., Блинов Ю.И. / Система автоматизированного исследования схем силовой электроники. // *Техническая электродинамика*, – 1985, – №1. С. 3 – 6.