

# Теория и практика плавки стали в системе Генератор – Индуктор – Загрузка

---

## Индукционная печь 250кг – сталь, чугун

**Александр Николаевич Юлегин, к.т.н.**

**12.07.2016**

На базе математической модели рассматривается процесс плавки в системе: генератор – индуктор – загрузка (сталь). На модели ставятся численные эксперименты и выявляются закономерности поведения системы с сильно изменяющимися параметрами в процессе нагрева. Сформулирован оптимум системы как способность стабилизации мощности на максимуме, когда на протяжении всего цикла нагрева поддерживается режим токоограничения генератора. Сравниваются две схемы генератора, и определяется лучшая из них: скорость выплавки на 24% выше, одновременно расход электроэнергии на 18% ниже. Эскизные чертежи плавильного узла, медной катушки и овальной медной трубки на рисунках 1, 2, 4 представлены компанией ООО «НПП ВакЭТО», г. Москва.

## Оглавление

1. Постановка задачи .....	2
2. Основные исходные данные плавильного узла.....	3
3. Коэффициент заполнения меди .....	4
3.1. Введение в теорию, пример плоскопараллельных шин .....	4
3.2. Коэффициент заполнения меди для круглой и овальной трубок .....	6
4. Теплосодержание расплава перед разливкой.....	7
5. Расчет емкости контура .....	9
6. Главный параметр номинального режима и допускаемый коэффициент перегрузки.....	10
7. Моделирование плавки, когда в тигель загружено цельное тело («козел»).....	12
7.1. Моделирование плавки при работе схемы ТПЧ-4 .....	12
7.2. Моделирование плавки при работе схемы ТПЧ-5 .....	17
8. Понятие о режиме оптимальной загрузки шихты .....	19
9. Исследование характеристик шихты.....	21
10. Обобщение требований к шихте .....	23
Литература.....	24

## 1. Постановка задачи

Порядка 50% всего индукционного нагрева приходится на плавку металлов, из них примерно 80% – плавка черных металлов с разными емкостями тиглей, например: 0.06, 0.16, 0.25, 0.4, 1.0, 2.5, 6.0 тонн. Емкости тигля 160 и 250кг являются наиболее массовыми, тигли емкостью 250кг составляет долю порядка 25...30% от количества всех тиглей. Исходя из приведенных данных, индукционная печь с емкостью тигля 250кг для плавки стали и чугуна составляет в промышленности долю 10...12% всех индукционных установок.

Вследствие широкого применения накоплен большой практический опыт и эмпирические знания по процессу индукционной плавки. Однако теоретические знания имеют разрозненный характер по отдельным частям системы. В частности, имеется обширная литература по расчету и моделированию индуктора без достаточно обоснованного согласования с генератором [1, 2, 4]. И наоборот, имеется не менее обширная литература по расчету и моделированию генераторов без достаточно обоснованного согласования с индуктором, например [5, 6].

К сожалению, только эмпирические знания из практического опыта дают ответы на те вопросы, которые остаются за пределами известных автору теоретических исследований, в частности, нет приемлемой точности расчета времени цикла плавки, экономии электроэнергии и т.п.

Ниже предлагается методика комплексного моделирования всей системы: генератор – индуктор – нагрузка. Предлагаемая методика дает приемлемую точность совпадения с данными, известными из практики, в результате расширяется горизонт теоретических знаний. Сравниваются две схемы генератора, предлагается лучшая из них.

## 2. Основные исходные данные плавильного узла

В Табл. 1 представлены основные исходные данные индукционной печи – геометрические и физические параметры расплава и медной катушки. На Рис. 1 дан эскизный чертеж плавильного узла, а на Рис. 2 – эскизный чертеж медной катушки.

Табл. 1. Основные геометрические и физические исходные данные печи

Пп	Параметр	Обозн.	Ед.	Значение
1	Длина столба расплава	$L_z$	см	40
2	Диаметр столба расплава	$D_2$	см	32
3	Объем расплава	$V_z$	дм <sup>3</sup>	32
4	Масса расплава	$m_z$	кг	250
5	Состав расплава	–	–	сталь, чугун
6	Внутренний диаметр медной катушки	$D_1$	см	49
7	Длина медной катушки	$a$	см	60
8	Внешний радиус исходной трубки	$R_1$	см	0.9
9	Толщина стенки трубки	$wd1$	см	0.25
10	Профилированная трубка	–	–	овал
11	Размеры профиля трубки	$h \times b$	см	1.3 x 2.1
12	Число витков катушки	$w1$	–	10
13	Число параллельных трубок в одном витке	–	–	2

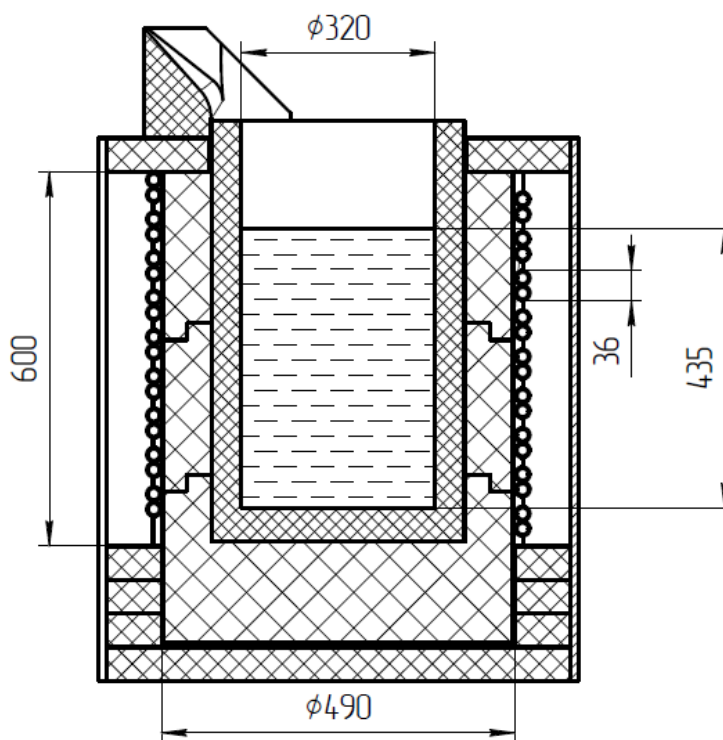


Рис. 1. Чертеж плавильного узла

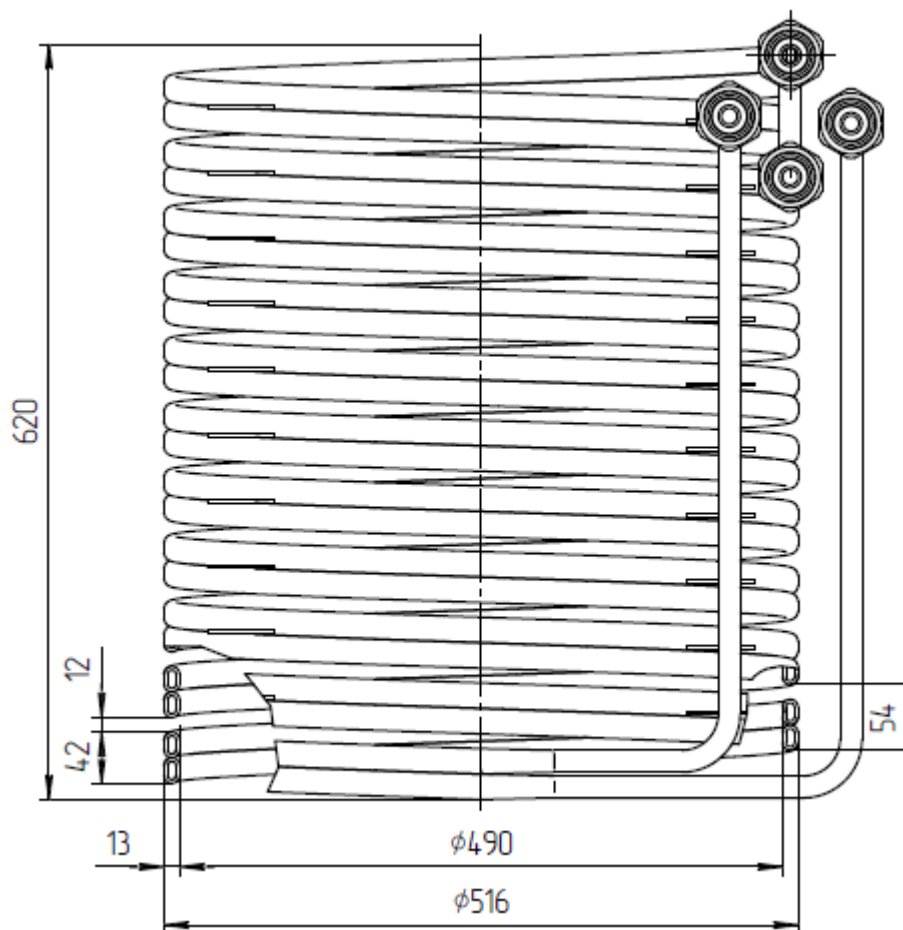


Рис. 2. Чертеж медной катушки

### 3. Коэффициент заполнения меди

#### 3.1. Введение в теорию, пример плоскопараллельных шин

Если речь идет о медной обмотке, то используется понятие т.н. коэффициента заполнения меди для окна обмотки. Когда в обмотке только один слой витков, как в индукторе, то используется понятие коэффициента заполнения меди по длине катушки. В случае высокой частоты тока на коэффициент заполнения меди влияют не только межвитковые зазоры, но и поверхностный эффект вытеснения тока. В случае одного витка логичнее было бы говорить о «коэффициенте использования меди», однако во всех случаях будем использовать установившийся термин «коэффициент заполнения меди».

Чтобы провести оценку коэффициента  $K_1$  заполнения меди и остановиться на том или ином численном значении, для начала необходимо строго определить, что считать за единицу  $K_1=1$ . Такое определение необходимо, чтобы дать далеко не очевидное понимание существования случаев, когда  $K_1$  несколько превышает единицу (хотя и немного, в пределе до 1.088). Рассмотрение этих случаев иллюстрирует различие понятий активного слоя меди и глубины проникновения тока в медь. Рассмотрение этих вопросов дает подход к расчету  $K_1$  для круглой и овальной трубок. Такой расчет, представленный в следующем разделе 3.2, основывается на определении понятия активного пространства в поперечном сечении круглой и овальной трубок.

На Рис. 3 показано поперечное сечение весьма широких шин, между которыми поле плоскопараллельное. Максимальная напряженность поля находится в области зазора  $h$ , а напряженность наружного поля  $H_{\text{нар}} = 0$ .

Активное сечение меди для высокочастотного тока определяет т.н. скин-эффект (или эффект близости) – вытеснения тока на поверхность проводника в область наибольшей напряженности

магнитного поля. Плотность высокочастотного тока уменьшается в направлении уменьшения напряженности поля. Т.н. «глубина проникновения тока» вычисляется по формуле:

$$(1) \quad \Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}},$$

откуда, применительно к медному проводнику:

$$(2) \quad \Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 0.225 \text{ см},$$

где  $f = 1000$  Гц – частота контурного тока;

$\rho = 2 \cdot 10^{-6}$  Ом\*см – удельное электрическое сопротивление для горячей меди (70°C).

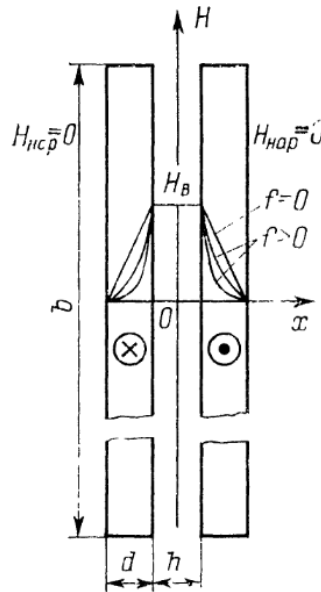


Рис. 3. Поперечное сечение весьма широких шин, наружное поле системы шин  $H_{нар}=0$

Для понимания наглядной физической интерпретации предварительно необходимо определить важное понятие активного слоя меди: это слой, в котором весь ток проводника условно собран в слой прямоугольного сечения с равномерно распределенной плотностью.

Когда используется термин «глубина проникновения тока», всегда имеется в виду математическая величина  $\Delta$ , рассчитанная по формуле выше. Можно дать также физическое определение глубины проникновения – это толщина активного слоя меди для частного случая, когда толщина проводника  $d$  более чем в 3 раза перекрывает глубину проникновения  $d > 3 \cdot \Delta$ , где  $\Delta$  рассчитана по формуле (2).

В других частных случаях, активный слой меди может быть как меньше (что очевидно), так и больше (что весьма не очевидно) глубины проникновения  $\Delta$ . Эти случаи рассмотрены ниже.

Коэффициент заполнения меди  $K_1$ , используемый в математической модели расчета индукторов [2], считается строго равным единице  $K_1 = 1$  при двух условиях: 1) между витками катушки нет зазоров; 2) толщина активного слоя меди точно совпала с глубиной проникновения  $\Delta$ .

В [1] на странице 52 в таблице 4.1 представлен т.н. коэффициент увеличения активного сопротивления по отношению к постоянному току –  $k_r$ , который равен соотношению толщины проводника к толщине активного слоя меди. В [1] даны значения  $k_r$  в зависимости от параметра  $2d/\Delta$  (соотношение удвоенной толщины проводника к глубине проникновения). В отдельной строке этой же таблицы источника [1] дан параметр  $\phi(2d/\Delta)$ , который совпадает с обратной величиной коэффициента заполнения  $1/K_1$ . Выборка данных из упомянутой таблицы источника [1] приведена в Табл. 2.

Табл. 2. Значения коэффициента заполнения K1 в зависимости от толщины проводника

Параметр	Значения							
$d/\Delta$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
K1	0.922	1.012	1.038	1.088	1.076	1.053	1.006	1.000
$k_r$	1.085	1.185	1.33	1.47	1.67	1.9	2.49	3.0

Из Табл. 2 видно, что коэффициент заполнения достигает максимума  $K1=1.088$  при толщине проводника в 1.6 раза больше глубины проникновения  $d=1.6*\Delta$ . Дальнейшее утолщение проводника дает обратный эффект – K1 уменьшается и потери в проводнике растут, хотя и незначительно.

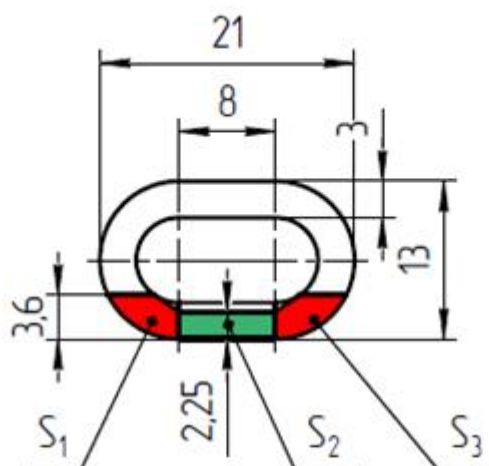
Происходит наложение двух факторов, сказывается краевой эффект – взаимное влияние двух противоположных плоскостей шины. Удаление противоположной плоскости, сначала приводит к росту активного сечения, затем к его уменьшению, поскольку ухудшается равномерность распределения тока. Оптимальное использование проводника находится в точке  $d=1.6*\Delta$ , где потери минимальны.

Еще один полезный вывод, который можно сделать из Табл. 2, заключается в том, что при толщине шины  $d=1.2*\Delta$ , получим коэффициент заполнения  $K1=1$ , такой же как при толщине шины более  $2.5*\Delta$ . Толщина проводника  $d$  менее  $1.2*\Delta$  дает распределение тока, близкое к равномерному.

### 3.2. Коэффициент заполнения меди для круглой и овальной трубок

Плоскопараллельные шины на Рис. 3 – это аналог трубок прямоугольного сечения в медной катушке индуктора. Силовые линии магнитного поля катушки располагаются перпендикулярно виткам и параллельно плоскости активного слоя меди – также как у параллельных шин.

Если же трубки имеют круглое сечение, то линии силового поля катушки уже не совсем прямолинейны – искривляются в пространстве между трубками. Расчет искривлений силовых линий является сложной математической задачей, решение которой вряд ли оправдано с затратной точки зрения. Однако можно сделать некоторые разумные предположения.



$S_1=10,5 \text{ мм}^2$  – с коэффициентом 1,6 для участка проводника круглого сечения  
 $S_2=2,25 \times 8=18 \text{ мм}^2$  – с коэффициентом 1 для участка проводника прямого сечения  
 $S_3=10,5 \text{ мм}^2$  – с коэффициентом 1,6 для участка проводника круглого сечения  
 Суммарная площадь  $39 \text{ мм}^2$

Рис. 4. Активный слой меди в трубках круглого и прямоугольного профиля

Можно предположить, что активный слой меди в круглой трубке охватывает пространство, размер которого порядка  $1.6*\Delta$  от края трубки. Именно этот размер пространства (см. раздел выше 3.1)

является активным для плоскопараллельных шин, поскольку при толщине шины  $d=1.6 \cdot \Delta$  имеем максимальный коэффициент заполнения  $K1=1.088$  и минимальные потери в меди.

Расчет активного сечения в круглой и овальной трубках строится на предположении, что всё сечение меди, оказавшееся в пространстве размером  $1.6 \cdot \Delta$ , является активным. При этом должно выполняться условие: толщина стенки трубки должна быть не более  $1.2 \cdot \Delta$  – условие достаточно равномерного распределение плотности тока (см. раздел 3.1).

На Рис. 4 показан профиль медной трубки после профилирования в овал. На профиле выделены отдельные участки сечений, из которых складывается суммарное активное сечение меди:

$$(3) \quad S_{cu} = 2 \cdot 10.5 + 18 = 39 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения меди с учетом зазоров между сдвоенными трубками рассчитывается по формуле:

$$(4) \quad K1 = \frac{2 \cdot w1 \cdot S1}{a \cdot \Delta} = 0.578,$$

где активное сечение трубки  $S_{cu}=0.39 \text{ см}^2$ , глубина проникновения тока  $\Delta=0.225 \text{ см}$ , число витков  $w1=10$ , длина катушки  $a=60 \text{ см}$  (см. Табл. 1).

#### 4. Теплосодержание расплава перед разливкой

Удельное теплосодержание расплава стали перед разливкой согласно [1], с.257, составляет  $1.42 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/кг}$ . Точно совпадающее значение удельного теплосодержания стали получим при интегрировании известной из [2] зависимости удельной теплоемкости от температуры (Рис. 5), если взять пределы интегрирования от  $25^\circ\text{C}$  до  $1600^\circ\text{C}$ .

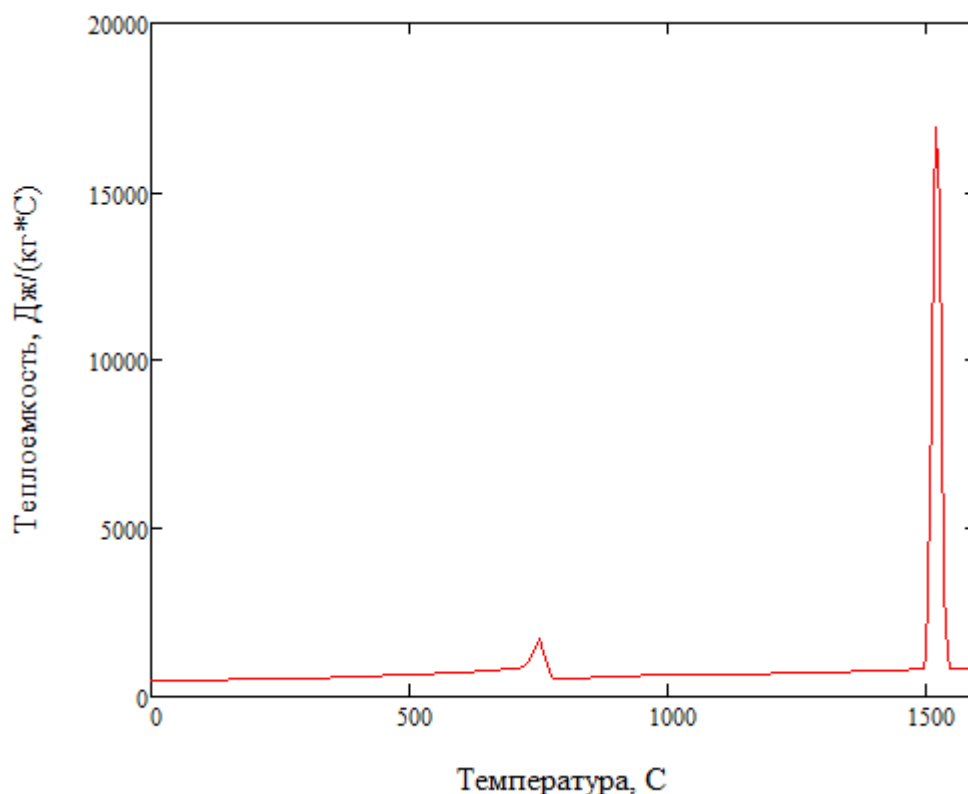


Рис. 5. Зависимость удельной теплоемкости от температуры для стали

Известно (см. Википедию), что удельная теплоемкость холодного чугуна больше удельной теплоемкости холодной стали примерно на 20%. Более содержательные данные по теплоемкости

(зависимость от температуры) получить затруднительно, т.к. существует много разновидностей чугуна и данные разбросаны. Хотя удельная теплоемкость чугуна выше, но удельный вес чугуна меньше чем у стали ( $\gamma$  чугуна  $6.6...7.4 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma$  стали  $7.8 \text{ г/см}^3$ ), поэтому объемные теплоемкости уравниваются. Для плавки именно объемная теплоемкость имеет значение, поскольку тигель имеет фиксированный объем. Температура плавления чугуна  $1100...1300^\circ\text{C}$ , что значительно меньше, чем у стали ( $1540^\circ\text{C}$ ). Следовательно, удельное теплосодержание чугуна должно быть существенно меньше чем у стали. По опыту известно, что плавка чугуна занимает меньше времени, чем плавка стали в том же объеме тигля при прочих равных условиях.

Для оценки времени плавки будем исходить из удельного теплосодержания стали  $1.42 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/кг}$ , что гарантирует запас по отношению к чугуну.

Полное теплосодержание расплава перед разливкой определяется по формуле:

$$(5) \quad Q_z = q_z \cdot m_z = 355 \text{ МДж} = 98.6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 100 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $q_z = 1.42 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/кг}$  – удельное теплосодержание стали;

$m_z = 250 \text{ кг}$  – масса разлива.

Теплосодержание расплава  $Q_z$  является важной константой, не зависящей ни от каких факторов. Неважно, какие потери в окружающую среду и сколько времени длится цикл плавки, неважно, от какого источника питается индуктор, сколько витков в катушке и из какой трубки она изготовлена. Важны только два сомножителя: масса расплава и удельное теплосодержание перед разливкой. Во всех вариантах необходимо обеспечить одну и ту же константу  $Q_z = 100 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Однако, геометрические и механические параметры плавильного узла, а также электрические параметры генератора, повлияют на основные показатели печи:

- Скорость расплавления и перегрева,  $\text{т/ч}$ ;
- Удельный расход электроэнергии на расплавление и перегрев,  $\text{кВт} \cdot \text{ч/т}$ .

Ниже проводится анализ цикла плавки с использованием двух вариантов схемы генератора:

- Схема ТПЧ-4 (Рис. 6) – на базе классического автономного инвертора тока (АИТ) с большим (сглаживающим) дросселем  $L_d$  на входе инвертора, исполнение ТПЧ-250-0,5/1,0 или аналог.
- Схема ТПЧ-5 (Рис. 7) – на базе автономного инвертора тока с синхронным прерывателем (АИТ СП) с малым (коммутирующим) дросселем  $L_d$  на входе инвертора и сглаживающей емкостью  $C_d$  в звене постоянного тока, исполнение Т5М-270-1.0/0.5-700-380.

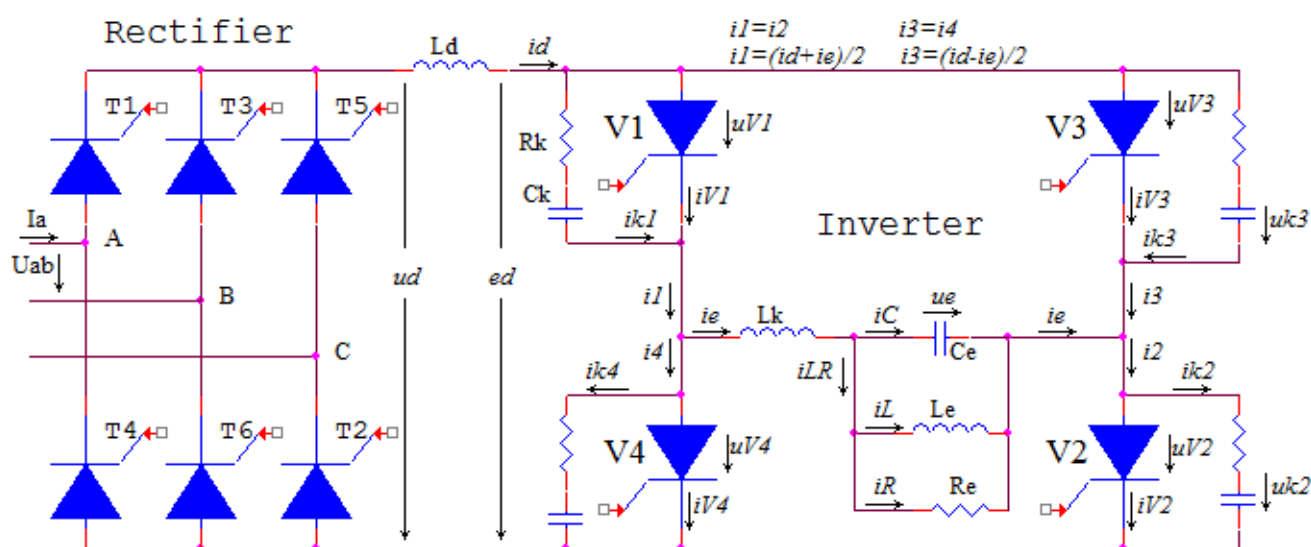


Рис. 6. Схема ТПЧ-4 на базе классического автономного инвертора тока (АИТ) с большим сглаживающим дросселем  $L_d$



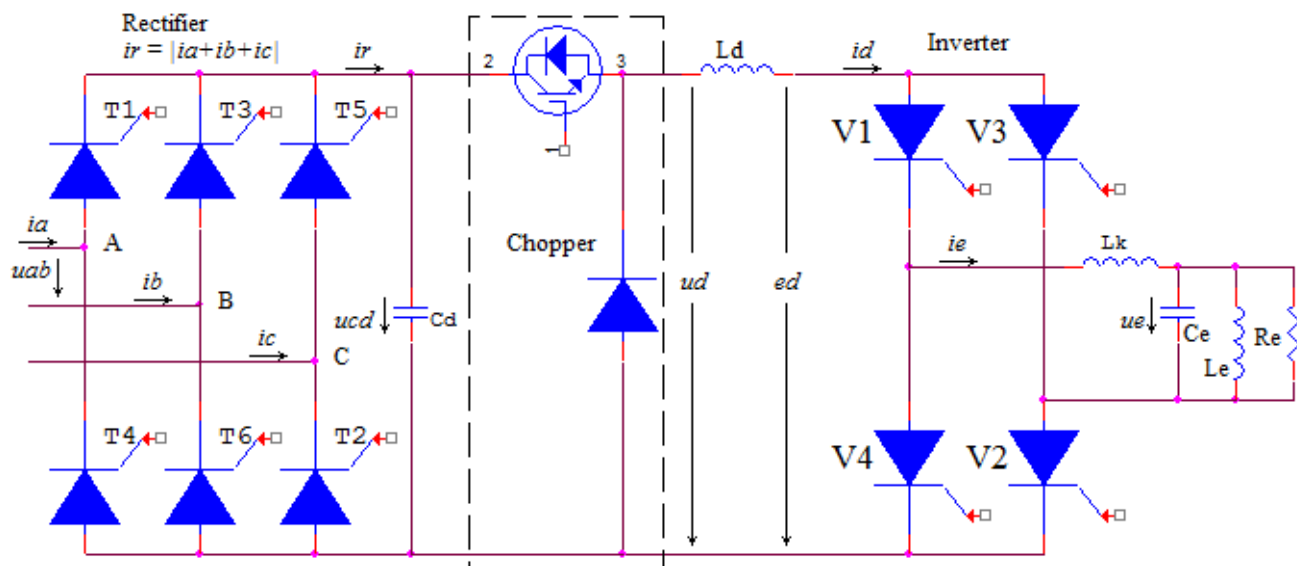


Рис. 7. Схема ТПЧ-5 – на базе автономного инвертора тока с синхронным прерывателем (АИТ СП) с малым дросселем  $L_d$

В схеме ТПЧ-5 прерыватель выполнен на базе одного или нескольких IGBT-транзисторов и называется чоппером. Классификационное наименование АИТ СП имеет альтернативное название – чопперный инвертор.

Медная катушка и плавильный узел во всех вариантах без изменения соответствуют Табл. 1. Анализ проводится только для стали, т.к. для нее в отличие от чугуна, все параметры достоверно известны, определена температура разлива  $1600^{\circ}\text{C}$  и теплосодержание  $Q_z=100\text{кВт}\cdot\text{ч}$ .

## 5. Расчет емкости контура

Емкость контура  $C_e$  выбирается по условию частоты 1 кГц в завершающей точке цикла плавки – температура расплава  $1600^{\circ}\text{C}$ . Мощность генератора может быть взята в диапазоне 250...270кВт (точное значение мощности слабо влияет на выбор емкости контура). Для обеих схем ТПЧ-4 и ТПЧ-5 в случае одинаковой емкости контура  $C_e$  и одной и той же нагрузки в завершающей точке плавки будут одинаковые основные параметры: мощность, напряжение, частота.

В Табл. 3 показаны результаты расчета на математической модели [3] в завершающей точке цикла плавки. В исходных данных задано условие, что крышка тигля открыта, потери на теплоизлучение и конвекцию максимальны. В этой точке термический КПД ( $\eta_T$ ) и полный КПД ( $\eta$ ) минимальны.

Получена емкость контура  $C_e=1210\text{ мкФ}$  при частоте  $f_1=1002\text{Гц}$  и мощности  $P_1=263\text{кВт}$ .

Табл. 3. Параметры в конце цикла нагрева

Пп	Параметр	Обоз.	Ед.	Значение
1	Масса расплава	mz	кг	250
2	Температура расплава	Tz	$^{\circ}\text{C}$	1600
3	Состав расплава	—	—	Сталь
4	Теплосодержание расплава	$Q_z$	$\text{кВт}\cdot\text{ч}$	100
5	Контурная частота	$f_1$	кГц	1.002
6	Емкость контура	$C_e$	мкФ	1210
7	Рабочее напряжение	U1	В	639
8	Мощность генератора	P1	кВт	263
9	Мощность в нагрузке	Pz1	кВт	171
10	Потери в меди	$P_{cu}=P_1-P_{z1}$	кВт	91.7
11	Потери на излучение конвекцию и теплопередачу (крышка тигля открыта)	Pt	кВт	52.4

12	Полезная тепловая мощность	$P_{z2}=P_{z1}-P_t$	кВт	119
13	Электрический КПД	$\eta_e$	%	65.1
14	Термический КПД	$\eta_T$	%	69.3
15	Полный КПД	$\eta$	%	45.1
16	Косинус фи контура	$\cos\phi$	–	0.0879
17	Активная составляющая сопротивления индуктора	$Re_0$	$\Omega$	0.0121
18	Реактивная составляющая сопротивления индуктора	$Xe_0$	$\Omega$	0.137
19	Добротность индуктора	$Q=Xe_0/Re_0$	–	11.3

## 6. Главный параметр номинального режима и допускаемый коэффициент перегрузки

В математической модели [2,3] индуктор представлен в виде последовательной схемы замещения  $Le_0, Re_0$  – см. Рис. 8а. Загрузка тигля металлом вносит соответствующие доли в активное сопротивление  $Re_0$  и индуктивность  $Le_0$ , что называется приведением загрузки к медной катушке.

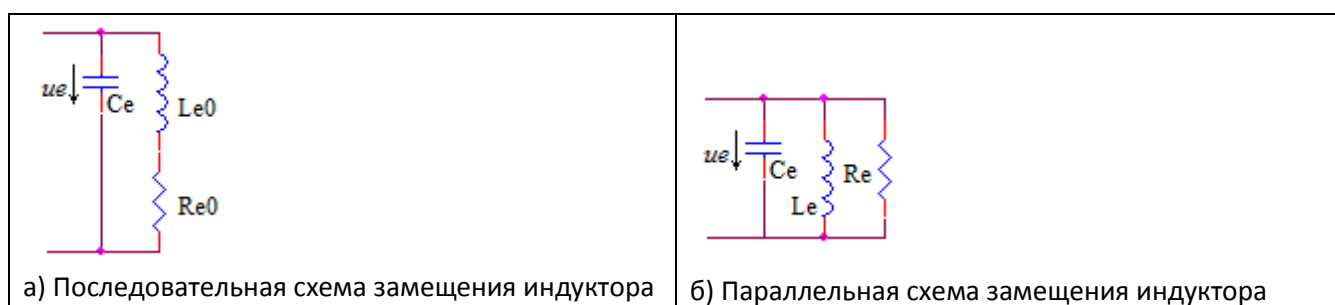


Рис. 8. Схема колебательного контура с двумя вариантами схемы замещения индуктора

Медная катушка имеет собственное активное и реактивное сопротивления, которые определяются при отсутствии загрузки. Внесение металла всегда приводит к увеличению  $Re_0$  и увеличению косинуса фи, в то же время индуктивность  $Le_0$  может как увеличиваться (металл магнитный), так и уменьшаться (металл немагнитный).

Для анализа режимов генератора последовательная схема замещения индуктора (Рис. 8а) неудобна, поэтому не используется. Вместо нее используется параллельная схема замещения индуктора  $Le, Re$  (Рис. 8б) по той причине, что сопротивление  $Re$  однозначно определяет активную мощность контура:

$$(6) \quad P_e = \frac{U_e^2}{Re}$$

Удобство параллельной схемы в том, что один параметр  $Re$  влияет только на мощность, второй  $Le$  только на частоту контура. Зная мощность и напряжение, можно сразу однозначно найти сопротивление  $Re$ , не интересуясь никакими другими подробностями индуктора и контура, в том числе, неважна частота:

$$(7) \quad Re = \frac{U_e^2}{P_e}$$

Исходя из равенства активных мощностей последовательной и параллельной схем, легко найти связь активных сопротивлений обеих схем:

$$(8) \quad Re_0 \cdot I^2 = \frac{U_e^2}{Re} = \frac{I^2 (Re_0^2 + Xe_0^2)}{Re},$$

где  $X_{e0} = \omega \cdot L_{e0}$ , откуда получим общую формулу и конкретное значение  $Re1$  для режима в конце цикла (Табл. 3):

$$(9) \quad Re = \frac{Re0^2 + X_{e0}^2}{Re0}, \quad Re1 = \frac{0.0121^2 + 0.137^2}{0.0121} = 1.563 \, \Omega$$

Главным параметром номинального режима генератора является номинальное сопротивление:

$$(10) \quad R_n = \frac{U_{max}^2}{P_n} = \frac{700V^2}{250000W} = 1.96 \, \Omega,$$

где взята номинальная мощность  $P_n = 250kW$ , максимальное напряжение  $U_{max} = 700V$  берется с достаточным запасом по отношению к напряжению  $U1 = 639V$  в конце цикла (Табл. 3). Максимальное напряжение генератора одновременно считается номинальным  $U_n = U_{max}$  и закладывается в соответствующую стандартную табличную спецификацию ([СТС](#) [7]).

Для максимальной наглядности активное сопротивление нормируется по отношению к номинальному:

$$(11) \quad KR = \frac{Re}{R_n}$$

Например, по данным Табл. 3 определяется относительное активное сопротивление в конце цикла:

$$(12) \quad KR1 = \frac{Re1}{R_n} = \frac{1.563}{1.96} = 0.80$$

Относительное сопротивление  $KR$  имеет решающее значение для режима генератора. Поэтому построения тех или иных характеристик любой схемы генератора используется главная координата  $KR$ . Если  $KR < 1$ , то генератор находится в режиме токоограничения, и величину  $KR$  называют коэффициентом перегрузки, подразумевая под величиной перегрузки обратную величину  $1/KR$ . Например, если  $KR = 0.5$ , то перегрузка двукратная. Наоборот, при разгрузке индуктора имеем  $KR > 1$ , например, значение около  $KR = 4$  соответствует чаще всего пустому индуктору.

Диапазон изменения нагрузки принято оценивать по отношению крайних значений  $KR_{max}/KR_{min}$ .

Согласно утвержденным ТУ работа ТПЧ-4 гарантируется в зоне  $KR \geq 0.5$  (перегрузка двукратная). На границе этой зоны требуется очень точная настройка, выполняемая квалифицированным персоналом. Например, точная настройка требуется при Пуске ТПЧ-4 на застывший расплав – «козел», или стальной стакан, т.н. «шаблон», используемый для запекания теплоизолирующей футеровки.

Неустойчивость ТПЧ-4 при перегрузке возникает из-за влияния индуктивного сопротивления линии  $\omega L_k$ , соединяющей ТПЧ-4 с контуром. В линию ставится токоограничивающий дроссель  $8mK$ , чтобы ограничить  $di/dt$  в тиристорах. Из-за влияния индуктивности линии генератор относительно большой мощности (500кВт и выше) может попасть в зону неустойчивой или невозможной работы. При этом коэффициент перегрузки  $KR = Re/R_n$  не всегда меньше 0.5, может быть и несколько больше, что нарушает гарантии ТУ, если относительное индуктивное сопротивление линии  $\omega L_k/Re$  достаточно большое. В таких случаях приходится принимать специальные меры, например, делать соответствующий разрез в «шаблоне» или делать его из тонкого листа стали, чтобы увеличить сопротивление  $Re$  и выйти из зоны малого значения  $Re/R_n$ .

В генераторах ТПЧ-5 токоограничивающий дроссель в линии не требуется, т.к. ограничение  $di/dt$  обеспечивается коммутирующим дросселем  $L_d$ . Допускается как нулевая, так и относительно большая, индуктивность линии. Для схемы ТПЧ-5 разрешенная зона работы в 2.5 раза шире, критичное значение  $KR = 0.2$ , перегрузка 5-ти кратная. Пуск ТПЧ-5 на «козел» или «шаблон» гарантируется с большим запасом устойчивости и надежно обеспечивается достаточная мощность для разогрева.

## 7. Моделирование плавки, когда в тигель загружено цельное тело («козел»)

### 7.1. Моделирование плавки при работе схемы ТПЧ-4

Моделирование полного цикла плавки можно упростить, если в модели представить загрузку тигля в виде одного цилиндрического железного тела массой 250 кг – застывший расплав. В практике застывшая садка называется «козел». При опрокидывании тигля «козел» не может быть вытащен наружу, откуда и произошло это название. Застывшая садка (сварившаяся шихта) образуется при аварийной остановке технологического процесса, и имеет случайную форму, далекую от цилиндрической, иначе расплав можно было бы слить и «козла» бы не было.

Однако для простоты описания, сплошное цилиндрическое тело, принятое для моделирования, будем называть «козел». Результаты моделирования могут дать представление о существующих закономерностях процесса плавки и дать первое приближение к параметрам процесса. Кроме того, сравнительные характеристики, выраженные в процентном соотношении, могут сохраняться при переходе от идеализированного рассмотрения к реальному.

В исходных данных модели [2,3] задается геометрия индуктора, футеровки и загрузки. Также может задаваться геометрия дна и крышки тигля. Крышка может отсутствовать (открыта). В модели рассчитываются электромагнитные и тепловые поля в загрузке – распределения температур вдоль и поперек загрузки. В расчетах учитываются теплопередача через футеровку, теплоизлучение загрузки и конвекция воздуха. Кроме индуктора модель [3] включает в себя также колебательный контур и источник питания.

Начальная температура загрузки равна 25°C. Окончание подогрева в модели осуществляется по признаку, когда теплосодержание загрузки достигнет  $Q_z=100\text{кВт}\cdot\text{ч}$ .

Средняя по объему температура загрузки, имеющая теплосодержание 100кВт·ч, несколько выше 1600°C (примерно 1730°C). Дело в том, в реальном расплаве температура 1600°C распределена равномерно по всему объему, а в математической модели не учитывается перемешивание металла. Поэтому в завершающей точке существует большой разброс температур в загрузке (от 1100°C до 2200°C). Средняя по объему температура загрузки несколько выше 1600°C, поскольку та часть объема загрузки, которая недобрала температуру до точки плавления (1540°C), требует дополнительного теплосодержания на фазовый переход в расплавленное состояние.

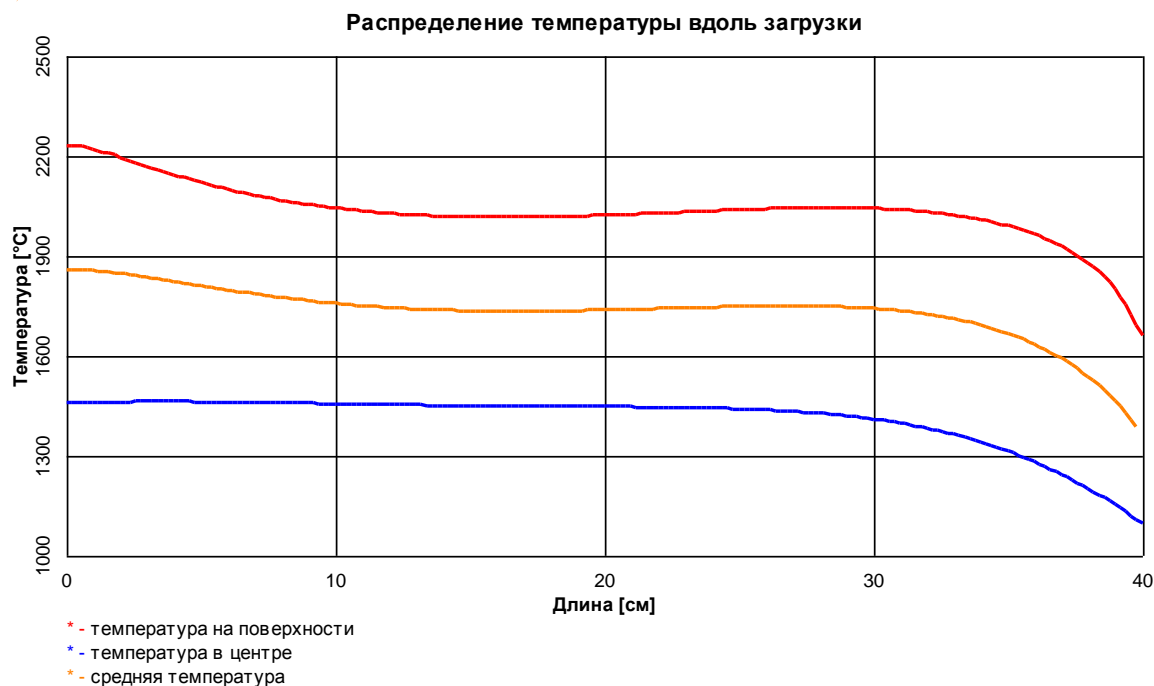


Рис. 9. Распределение температуры вдоль загрузки (цельное тело) в конце цикла

На Рис. 9 и Рис. 10 представлены результаты моделирования полного цикла плавки, где в качестве источника питания использована классическая схема инвертора тока с большим дросселем в звене постоянного тока (схема ТПЧ-4 на Рис. 6), номинальная мощность 250кВт.

На Рис. 9 представлено распределение температуры вдоль загрузки на завершающей стадии нагрева. Тигель повернут на 90 градусов по часовой стрелке так, что слева дно тигля, справа крышка. Крышка открыта, поэтому температуры справа ниже, чем слева. Под графиками даны подписи: температура на поверхности, температура в центре, средняя температура (по сечению).

На Рис. 10 представлены графики изменения в цикле нагрева электрических параметров:

- Активная мощность генератора;
- Напряжение генератора;
- Частота генератора;
- Электрический КПД индуктора;
- Полная энергия системы индуктор-загрузка в кВт-часах;
- Перенесенная в загрузку энергия в кВт-часах;
- Потери энергии на излучение и конвекцию в кВт-часах;
- Относительное активное сопротивление индуктора  $K_R$ .

Конец цикла  $t_z = 2747c = 45.8 \text{ мин} = 0.763 \text{ ч}$ . Скорость выплавки 1 тонны стали:

$$(13) \quad v_1 = \frac{0.25 \tau}{t_z} = 0.328 \text{ т/ч}$$

Если из предпоследней кривой (энергия в загрузке) вычесть последнюю кривую (энергия потерь), то получим кривую роста теплосодержания в кВт-часах. Последняя точка этой разницы равна заданному значению теплосодержания 100 кВт-ч.

В исходных данных математической модели [3] заданы напряжение сети  $U_s = 380 \text{ В}$  и номинальная мощность генератора  $P_n = 250 \text{ кВт}$ . По этим данным в модели автоматически рассчитываются напряжение открытого выпрямителя и номинальный ток инвертора:

$$(14) \quad U_{dn} = 1.32 U_s = 500 \text{ В}$$

$$(15) \quad I_{dn} = \frac{P_n}{U_{dn}} = \frac{250000}{500} = 500 \text{ А}$$

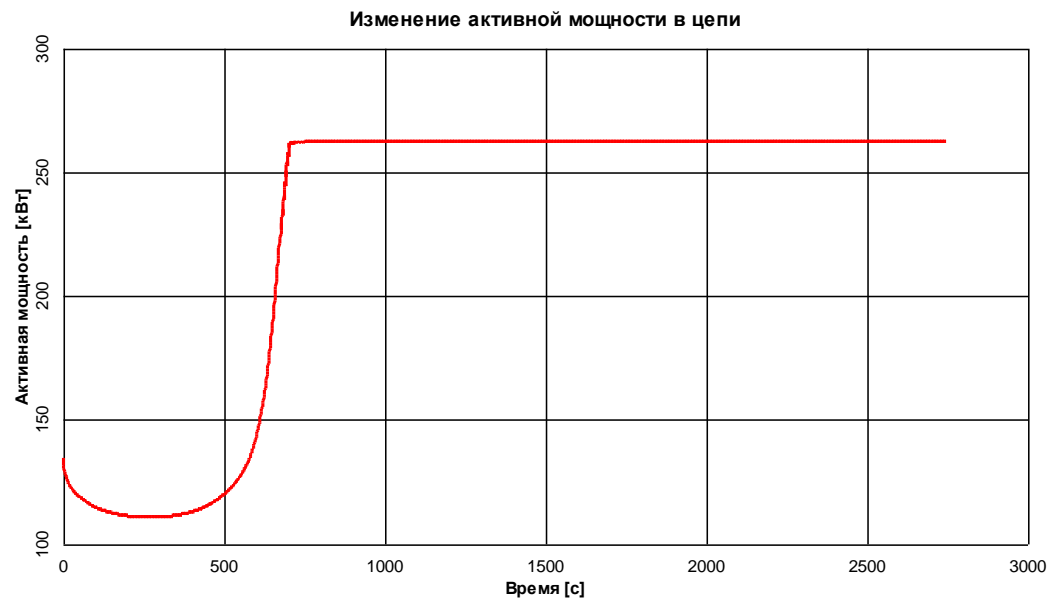
Максимальный ток в режиме токоограничения в модели [3] берется на 5% больше номинального:

$$(16) \quad I_{dmax} = 1.05 I_{dn} = 525 \text{ А}$$

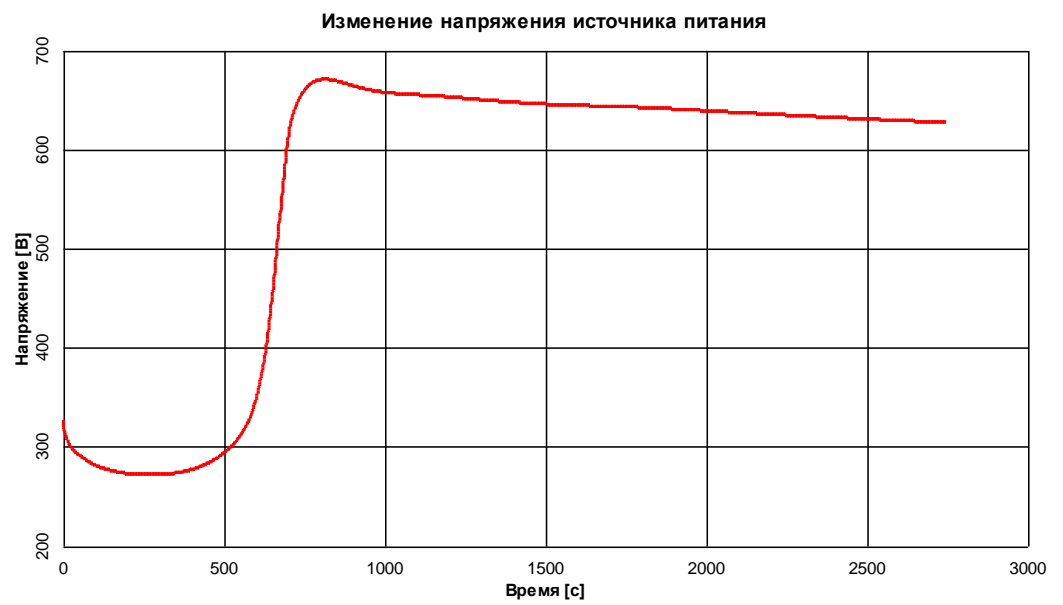
Поэтому мощность в соответствующих режимах ограничения тока может оказаться на 5% больше номинальной  $250 * 1.05 = 263 \text{ кВт}$ , что видно по графику мощности («полка» ограничения).

В начальной части цикла мощность снижена (Рис. 10а) – это режим глубокого токоограничения. Выпрямитель глубоко зарегулирован  $U_d < U_{dn}$ , а ток прежний  $I_d = I_{dmax}$ , соответственно мощность низкая. По графику виден (в точке 270 секунд) минимум мощности 110 кВт – более чем в 2 раза ниже номинальной мощности 250кВт.

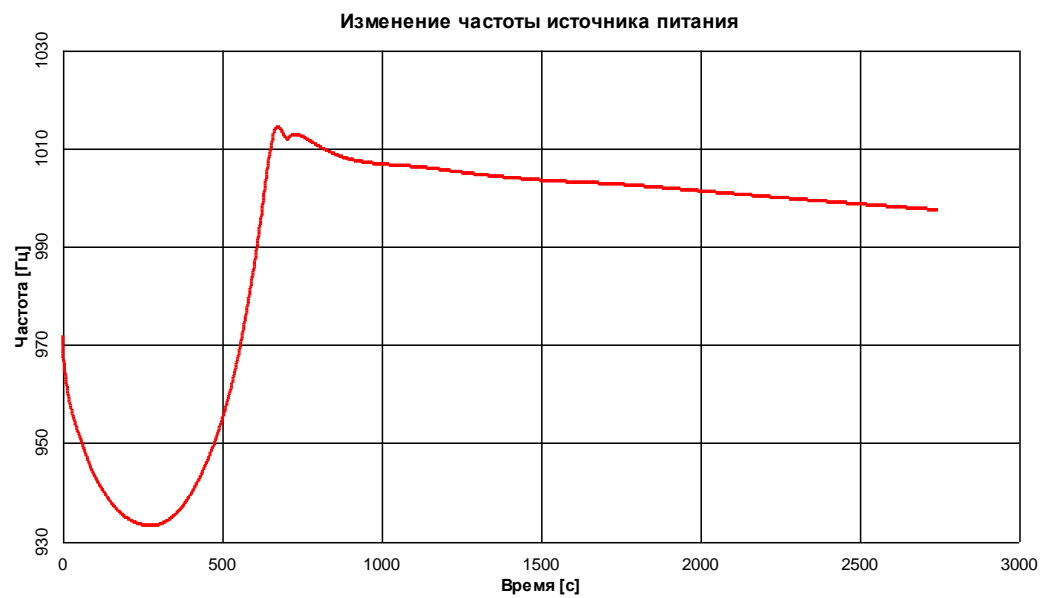
Режим глубокого токоограничения возникает вследствие относительно высокой активной составляющей контура при холодной и теплой загрузке. Рост активной составляющей контура проявляется в повышении косинуса  $\phi$ , повышении активного сопротивления  $Re_0$  для последовательной схемы замещения индуктора (Рис. 8а) и понижении активного сопротивления  $Re$  для параллельной схемы замещения индуктора (Рис. 8б). Сопротивление  $Re$  характеризует только контур, загрузку индуктора и свойства металла, никак не зависит ни от схемы ТПЧ, ни от его режима.



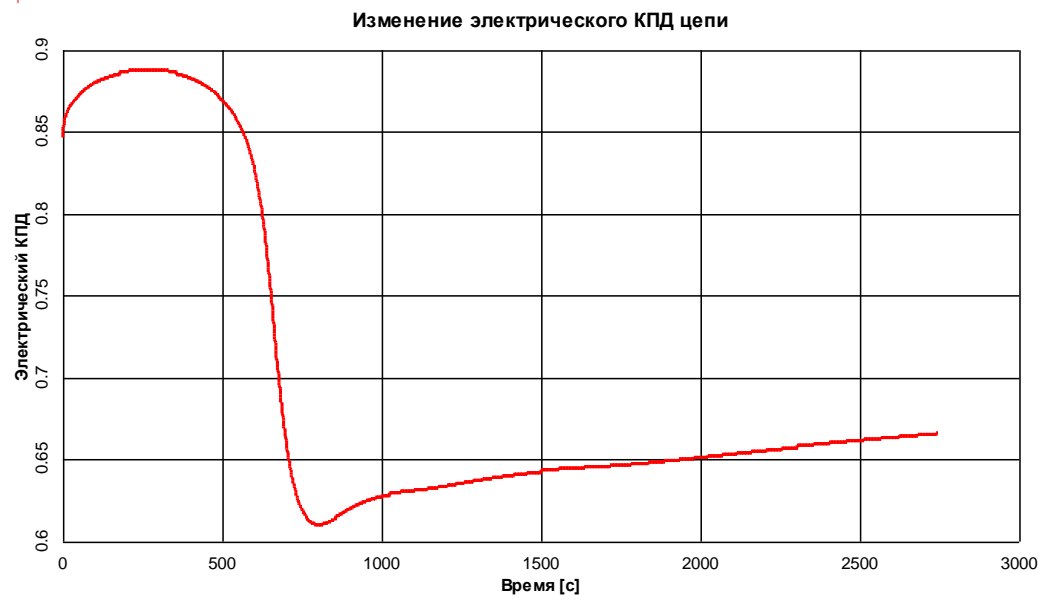
а)



б)



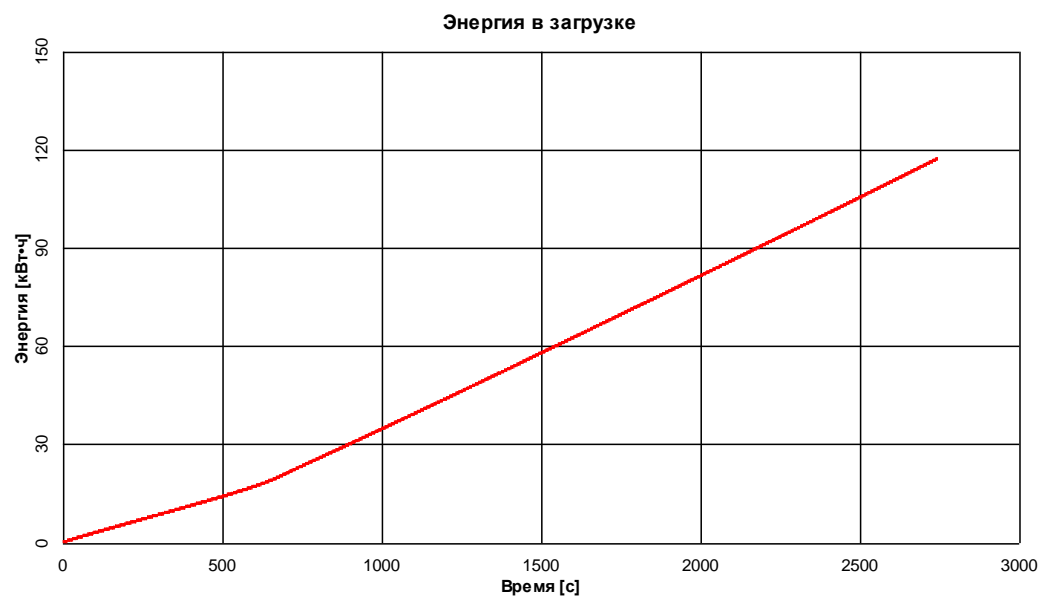
в)



г)



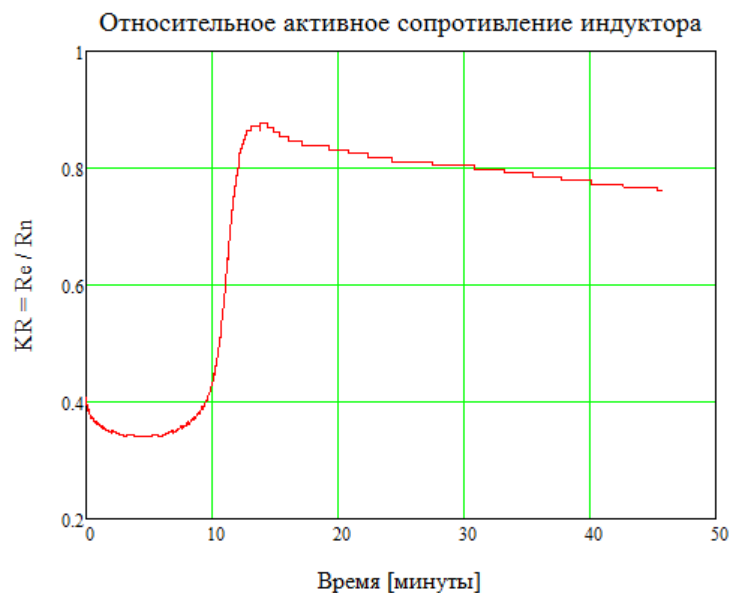
д)



е)



ж)



з)

Рис. 10. Изменение электрических параметров в цикле плавки

Согласно графику  $KR = R_e / R_n$  (Рис. 10з) имеем в начале цикла ( $t=0$ ) относительное сопротивление  $KR=0.4$ , далее наступает минимум  $KR=0.34$ ,  $t=270$ с (4.5 минут). Как уже сказано выше, относительное сопротивление также называют коэффициентом перегрузки для случая  $KR < 1$ . Если напряжение контура оставалось бы номинальным в точке  $KR=0.34$ , то потребление активной мощности в этой точке было бы в 3 раза больше номинальной  $P_e = P_n / 0.34$ , т.е. перегрузка 3-х кратная. Перегрузка автоматически устраняется путем снижения напряжения к значению, при котором ток выходит на ограничение  $I_d = I_{dmax}$ . В точке  $KR=0.34$  напряжение опускается до 270В, мощность 110кВт, в этот момент частота минимальна 933 Гц, а электрический КПД индуктора максимальный 0.888 (см. графики а, б, в, г на Рис. 10).

Когда средняя по объему температура загрузки проходит точку Кюри (примерно 730°C) режим глубокого токоограничения заканчивается. Выпрямитель открывается и мощность выходит на максимум  $1.05 \cdot P_n = 263$ кВт в точке  $KR=0.74$ ,  $t=700$ с (11.7 минут). Далее мощность стабильна, а напряжение продолжает подниматься. В точке  $KR=0.87$ ,  $t=800$ с (13.3 минут), напряжение достигает максимума 672В. После этого напряжение начинает медленно снижаться: наступает режим «слабой» перегрузки: напряжение снижается незначительно, выпрямитель открыт, а ток максимальный  $I_d = I_{dmax}$ , в конечной точке цикла  $KR=0.76$ ,  $t=46$  минут. В режиме слабой перегрузки мощность на 5% выше номинальной (т.к. ограничение тока на 5% выше номинального тока). В цикле нагрева  $KR$



последовательно проходит вышеописанные характерные точки: 0.4 – 0.34 – 0.74 – 0.87 – 0.76. Диапазон изменения нагрузки принято характеризовать соотношением крайних значений:  $0.87/0.34=2.6$ .

В схеме ТПЧ-4 ток выпрямителя и инвертора протекает в последовательной цепи через сглаживающий дроссель, поэтому ток в питающей сети во всем цикле нагрева держится на максимуме также как входной ток инвертора – на 5% выше номинального значения. Соответственно, полная мощность сети стабильно на 5% выше номинального значения во всем цикле нагрева.

В комплекте генератора нет блока компенсации реактивной мощности сети, поэтому цена электроэнергии определяется полной потребляемой мощностью генератора. Поскольку в начале цикла нагрева выпрямитель глубоко зарегулирован, реактивная мощность генератора значительно превышает активную мощность. В момент открытия выпрямителя реактивная мощность приходит к нулю.

Дополнительно сеть нагружают внутренние потери генератора. Отличие КПД генераторов ТПЧ-4 (96%) и ТПЧ-5 (98%) дает разницу внутренних потерь в 2 раза. Разница значительная, поэтому ее необходимо также учитывать. Следовательно, по известному времени цикла  $t_z=0.763$ ч можно найти полный расход электроэнергии  $Q_1$  и удельный расход электроэнергии  $q_1$  на 1 тонну выплавки стали:

$$(17) \quad Q_1 = (1.05 + 0.04) \cdot P_n \cdot t_z = 1.09 \cdot 250 \text{ кВт} \cdot 0.763 \text{ ч} = 208 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$(18) \quad q_1 = \frac{Q_1}{0.25 \text{ т}} = 832 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

## 7.2. Моделирование плавки при работе схемы ТПЧ-5

Ниже рассматривается цикл плавки при работе схемы ТПЧ-5 на базе инвертора с IGBT-чоппером и малым (коммутирующим) дросселем на входе инвертора. По сравнению со схемой ТПЧ-4 на базе классического инвертора тока с большим (сглаживающим) дросселем, схема ТПЧ-5 имеет ряд преимуществ, в том числе, выше КПД и меньше чувствительность к изменению нагрузки. Ниже показано, что в начале цикла плавки у ТПЧ-5 возникает двойной эффект: потребляемый ток в сети значительно ниже, а активная мощность на выходе генератора значительно выше.

Потери в коммутирующем дросселе ТПЧ-5 многократно меньше потерь в сглаживающем дросселе ТПЧ-4. Также почти на порядок меньше потери в демпфирующих RC-цепях в худших режимах (а в основных режимах равны нулю). Полные потери ТПЧ-5 примерно вдвое меньше полных потерь ТПЧ-4, соответственно КПД генератора в номинальном режиме поднимается от 96% к 98%. Меньше потерь – меньше расход воды, к тому же вода в ТПЧ-5 изолирована от электрического потенциала. Кроме того, массогабаритные показатели силового блока ТПЧ-5 примерно вдвое меньше по отношению к ТПЧ-4. Преимущества по потерям и занимаемой площади позволяют применять увеличенную мощность ТПЧ-5 по отношению к ТПЧ-4 при прочих равных условиях. В данном случае, с целью увеличения производительности плавки (с одновременным сокращением всех потерь), будем рассматривать номинальную мощность 270кВт генератора ТПЧ-5 против 250кВт генератора ТПЧ-4.

В состав математической модели [3] нагрева включен модельный блок только старой классической схемы инвертора тока ТПЧ-4. Однако для моделирования нагрева с использованием новой схемы ТПЧ-5 можно использовать прием аппроксимации. Суть приема в том, что работа новой схемы и старой схемы уравниваются по энергетическим характеристикам, если в старой схеме подставлять переменные параметры, зависящие от текущего режима нагрева. Однако, трудность в том, что в исходных данных модели [3] параметры могут задаваться только в виде констант. Поэтому цикл нагрева приходится разбивать на несколько характерных интервалов, и в каждом интервале закладывать соответствующие параметры классической схемы инвертора. В результате получим работу классической схемы с переменными параметрами.

Графики на Рис. 11а,б,в показывают, что ТПЧ-5 в сравнении с ТПЧ-4 менее чувствителен к изменяющейся нагрузке (отношение одинаковое  $KR_{max}/KR_{min}=2.6$ ). У ТПЧ-5 выпрямитель открыт во всем цикле нагрева, глубина опускания напряжения меньше (кривые б) и мощность выше (кривые а). Провал мощности заканчивается в 3 раза раньше, а полный цикл заканчивается на 24% быстрее: в ТПЧ-5 – время 37 минут (0.625ч) против ТПЧ-4 – 46 минут (0.763ч).

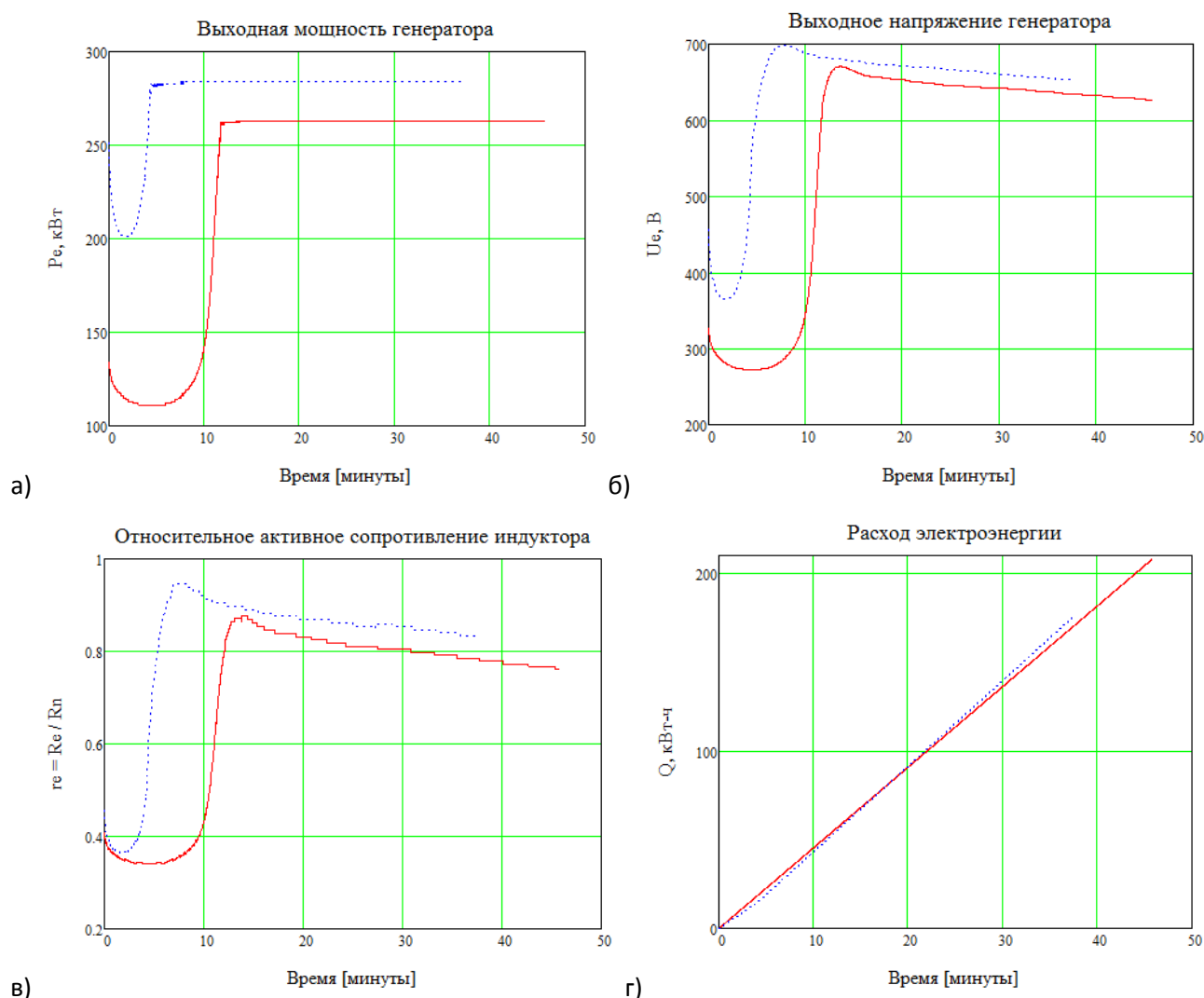


Рис. 11. Сравнение изменяющихся параметров в цикле нагрева для ТПЧ-4 (красная линия) и ТПЧ-5 (синяя пунктирная)

Скорость выплавки 1 тонны стали:

$$(19) \quad v_2 = \frac{0.25\tau}{0.625\text{ч}} = 0.4 \text{ т/ч}$$

На Рис. 11г показано два графика роста расхода электроэнергии в цикле плавки. Рост расхода электроэнергии в ТПЧ-4 строго линейный, т.к. ток все время на ограничении  $I_{dmax}=1.05 \cdot I_{dn}$ , потребляемая из сети полная мощность строго стабильна  $S_1=(1.05+0.04) \cdot P_n$ , конечная точка расхода  $Q_1=208$  кВт-ч на красной прямой Рис. 11г вычислена в разделе 7.1 по формуле (17).

В ТПЧ-5 полная мощность и активная мощность равны, т.к. выпрямитель открыт во всем цикле нагрева и реактивная мощность отсутствует. Кривая активной мощности контура  $P_e(t)$  соответствует графику на Рис. 11а (синяя кривая). К ней добавляются потери в генераторе  $0.02 \cdot P_n$ , откуда получаем полную мощность ТПЧ-5:

$$(20) \quad S_2(t) = P_e(t) + 0.02 \cdot P_n$$

Правда, в расчете потерь всей системы не учитываются потери в конденсаторах колебательного контура, поскольку потери в конденсаторах могут быть весьма различны в зависимости от их типа. Например, потери в современных конденсаторах с воздушным естественным охлаждением на порядок меньше потерь в конденсаторах старого типа с водяным охлаждением. При необходимости потери в конденсаторах можно рассчитать отдельно. В данном случае внимание сосредотачивается на экономии энергии остальной части системы.

Интегрируя полную мощность  $S_2(t)$ , получим кривую  $Q(t)$  расхода электроэнергии – синяя пунктирная линия на Рис. 11г:

$$(21) \quad Q(t) = \int_0^t S_2(t) dt$$

В завершающей точке кривой  $Q(t)$  получим для ТПЧ-5 итоговый расход электроэнергии  $Q_2 = 176$  кВт·ч. Следовательно, удельный расход на 1 тонну выплавки стали:

$$(22) \quad q_2 = \frac{Q_2}{0.25\tau} = \frac{176 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{0.25\tau} = 704 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \tau$$

Экономия электроэнергии по отношению к ТПЧ-4 (832 кВт·ч/т) составляет 18%, при том, что одновременно, как сказано выше, повышается скорость выплавки на 24% (0.4 т/ч против 0.328 т/ч).

В ТПЧ-5, также как в ТПЧ-4, во всем цикле входной ток инвертора находится на ограничении  $I_{d\max} = 1.05 \cdot I_{dn}$  и нагрузка изменяется в одинаковом диапазоне  $KR_{\max}/KR_{\min} = 2.6$ , различие только в уменьшении провала активной мощности, откуда делается вывод, что ТПЧ-5 лучше адаптируется к изменению нагрузки.

В данном случае процесс плавки моделировался при условии загрузки в тигель одного цельного стального тела 250 кг, где провал мощности в начале цикла обусловлен изменением нагрузки в широком диапазоне. В реальном процессе можно несколько уменьшить диапазон изменения нагрузки путем оптимизации загрузки шихты. Тогда показатели эффективности (скорость выплавки и расход электроэнергии) могут быть несколько выше рассчитанных. В то же время основные закономерности цикла нагрева остаются, и преимущественная эффективность ТПЧ-5 по отношению к ТПЧ-4, как будет показано ниже, сохраняется.

## 8. Понятие о режиме оптимальной загрузки шихты

В предыдущем разделе рассматривалась плавка цельного стального тела с широким диапазоном изменения сопротивления нагрузки  $KR_{\max}/KR_{\min}$ . Существует возможность уменьшить этот диапазон, если использовать порционный режим загрузки шихты и (или) подобрать размеры шихты, что позволит уменьшить провал мощности, показанный на Рис. 11а в начале цикла. Для схемы ТПЧ-5, имеющей лучшую адаптацию к изменению сопротивления нагрузки, можно совсем исключить провал мощности. Тогда во всем цикле нагрева вместе с удержанием тока на максимуме  $I_{d\max} = 1.05 \cdot I_{dn}$  будет удерживаться активная мощность на максимуме  $P_e = 1.05 \cdot P_n$ .

Это условие обеспечивается только при выполнении определенных требований к шихте. Как показывает практика эксплуатации, провалы мощности при использовании ТПЧ-4 избежать не удастся, поскольку чрезмерно высокие требования к порционному характеру загрузки шихты и строгие требования к ее размеру не оправданы с практической точки зрения.

Ниже будет показано, что схема ТПЧ-5, дает приемлемые требования к размеру шихты и режиму ее загрузки. Также рассматриваются границы требований как при полном исключении провала мощности, так и при относительно небольших провалах мощности.

Для нормирования провалов мощности выделены 6 узловых точек относительной мощности ( $P_e/P_n$ ): 1.05, 1.00, 0.95, 0.9, 0.85, 0.8. Первая точка – это граница  $U_{\min}$ , т.е. выше этой границы  $U_e > U_{\min}$  имеем постоянство мощности  $P_e = 1.05 \cdot P_n$ . Для каждого из упомянутых 6 узлов можно

расчетным путем найти соответствующее значение границы:  $U_{min1.05}$ ,  $U_{min1.00}$ ,  $U_{min0.95}$ ,  $U_{min0.90}$ ,  $U_{min0.85}$ ,  $U_{min0.80}$ . Все перечисленные границы весьма значительно зависят от частоты, а также от параметров конкретного генератора, в частности – от индуктивности коммутирующего дросселя  $L_d$  на входе инвертора.

Основные параметры данного генератора определены: номинальная мощность  $P_n=270\text{кВт}$ , напряжение сети  $U_s=380\text{В}$ , рабочий диапазон частоты  $f=0.5\ldots 1.0\text{кГц}$ ,  $L_d=100\text{мкГ}$ . На основе этих данных определяются все остальные параметры генератора, которые представлены в стандартной табличной спецификации (СТС), всего 284 параметра [7].

С помощью соответствующих инструментов, которые используются для формирования СТС, рассчитаны нижние границы напряжения в 6-ти вышеназванных узлах мощности и в 6-ти узлах частоты, всего  $6 \times 6 = 36$  точек. Результаты расчета представлены в Табл. 4, где дана нижняя граница напряжения как отношение  $U_{min}/U_{max}$  (в нашем случае  $U_{max}=700\text{В}$ ). В Табл. 5 представлены значения коэффициента перегрузки  $K_R$  в этих же 36 узлах.

Табл. 4. Нижняя граница напряжения генератора в зависимости от мощности и частоты

Мощность генератора	Umin/Umax (Umax=700В)					
	f=1.0кГц	f=0.9кГц	f=0.8кГц	f=0.7кГц	f=0.6кГц	f=0.5кГц
1.05*Pn	0.92	0.89	0.85	0.82	0.79	0.76
1.0*Pn	0.78	0.76	0.73	0.71	0.68	0.66
0.95*Pn	0.72	0.69	0.67	0.65	0.62	0.6
0.90*Pn	0.67	0.64	0.62	0.6	0.575	0.55
0.85*Pn	0.62	0.60	0.58	0.555	0.53	0.51
0.80*Pn	0.57	0.56	0.54	0.52	0.5	0.48

Табл. 5. Коэффициент перегрузки в зависимости от мощности и частоты

Мощность генератора	Коэффициент перегрузки $K_R=Re/R_n$					
	f=1.0кГц	f=0.9кГц	f=0.8кГц	f=0.7кГц	f=0.6кГц	f=0.5кГц
1.05*Pn	0.81	0.757	0.691	0.643	0.597	0.552
1.0*Pn	0.611	0.578	0.535	0.504	0.464	0.436
0.95*Pn	0.544	0.503	0.473	0.443	0.406	0.379
0.90*Pn	0.496	0.456	0.427	0.398	0.367	0.337
0.85*Pn	0.454	0.423	0.394	0.362	0.332	0.307
0.80*Pn	0.407	0.391	0.365	0.337	0.311	0.287

Как видно из Табл. 4, нижняя граница напряжения под действием двух факторов варьируется в диапазоне  $U_{min} = (0.48\ldots 0.92) U_{max} = 336\ldots 644\text{В}$ . Мощность обеспечивается  $P_e \geq 0.8 \cdot P_n$  в режиме токоограничения при перегрузке более 3-х кратной:  $1/K_{Rmin}=1/0.287=3.5$ .

В нашем случае основная рабочая точка, конец цикла,  $U_e=U_1=639\text{В}$  (Табл. 3) имеет хороший запас как к нижней границе  $U_{min}$  (Табл. 4), так и к верхней границе  $U_{max}=700\text{В}$ .

36 узловых точек в Табл. 4 дают возможность на основе 2-х размерной интерполяции построить функцию нижнего ограничения  $U_{min}$  в зависимости от 2-х переменных. Эту 2-х размерную функцию будем называть функцией токоограничения:

$$(23) \quad U_{min} = U_{min}\left(\frac{P_e}{P_n}, f\right)$$

Функция токоограничения (23) понадобится для расчета режимов генератора с конкретной геометрией шихты.

Режим загрузки шихты считается наилучшим, когда мощность не опускается ниже  $1.05 \cdot P_n$ . Отклонения мощности ниже этой границы возможны в двух случаях:

- а) Напряжение выходит на максимальную границу  $U_e = U_{\max}$ , но генератор не добирает мощность до значения  $1.05 \cdot P_n$ . Такое возможно, если шихта слишком мелкая или геометрически неоднородная, когда не получается плотное заполнение индуктора.
- б) Индуктор перегружен холодной шихтой. Генератор входит в режим глубокого токоограничения, где мощность  $P_e < 1.05 \cdot P_n$ .

Случай (а) предотвращается путем увеличения загрузки, а случай (б) наоборот – путем уменьшения загрузки. Контроль загрузки производится по показаниям измерительных приборов: мощность и напряжение.

Исследование характеристик шихты и требования к ней рассматриваются в следующем разделе.

## 9. Исследование характеристик шихты

В математической модели шихта представлена в виде пучка круглых прутков. Если прутки разрезаны на несколько брусков, то у всей цепочки отрезков прутка потребляемая мощность будет примерно такой же, как у цельного прутка. Для моделирования берутся одинаковые прутки по длине индуктора, определяющими факторами считаются диаметр прутков и их количество.

Рассмотрим коэффициент заполнения поперечного сечения тигля прутками. Теоретический предельный коэффициент заполнения сечения большого круга сечениями маленьких кружков (когда центры маленьких кружков попадают на вершины равностороннего треугольника) равен  $\pi/2\sqrt{3}=0.907$ . Для менее плотной упаковки, когда центры маленьких кружков находятся по углам квадрата, коэффициент заполнения равен  $\pi/4=0.785$ . Для определенности будем считать, что максимальный коэффициент заполнения поперечного сечения тигля равен 0.7. Чтобы полностью заполнить тигель массой 250 кг, потребуется увеличить длину прутков по отношению к высоте расплава 40 см с коэффициентом  $1/0.7$ , т.е.  $40/0.7=57$  см. В этом случае крышка тигля должна быть открыта, и концы прутков будут торчать из тигля.

Ниже рассматривается множество вариантов диаметров прутков, и с помощью математической модели [3] решаются две отдельные задачи: для каждого диаметра прутков определяется допустимый минимум (задача 1) и допустимый максимум (задача 2) самого первого заполнения тигля. В обеих задачах мощность генератора должна обеспечиваться близко к номинальному значению.

Задача 1 представляет интерес тогда, когда Потребителю в каком-то конкретном случае не требуется плавить полную массу 250 кг, или по каким-то причинам первая загрузка должна быть минимальной. Тогда Потребителю потребуется узнать допустимый минимум.

В задаче 1 берется максимальное напряжение генератора 700 В, определяется минимальное количество прутков данного диаметра, длина прутков равна высоте расплава 40 см.

В задаче 1 взята температура прутков 600°C, что объясняется ниже. В задаче 1 критичной является недогрузка генератора, в отличие от задачи 2, где критичной является перегрузка генератора. Хотя в действительности прутки закладываются в тигель холодными, но в задаче 1 температура прутков должна задаваться близко к точке Кюри (порядка 730°C), но не выше ее, например, 600°C. В процессе нагрева прутков в диапазоне температур 25...600°C не грозит недогрузка генератора. Наоборот, при низких температурах нагрузка выше. В тоже время, в зоне температур 25...600°C глубокая перегрузка тоже не грозит, т.к. тигель мало заполнен и есть большой запас опускания напряжения от 700 В вниз. А нагрев более 600°C в задаче 1 не рассматривается, т.к. предполагается закладка новой порции шихты. Сигналом к загрузке новой порции шихты служит снижение мощности при подходе к точке Кюри.

Во 2-ой задаче, где заполняется сразу вся масса 250 кг, задается максимальное количество прутков данного диаметра, берется коэффициент 0.7 заполнения поперечного сечения тигля, длина прутков 57 см, температура прутков 25°C. С использованием функции токоограничения (23) определяется напряжение генератора, при котором мощность генератора обеспечивается близко к номинальному значению.

Во всех численных экспериментах с шихтой емкость контура 1210 мкФ точно такая же как в Табл. 3, где обеспечивается частота 1 кГц перед сливом расплава. Ниже представлены результаты решения задач 1 и 2.

**Задача 1.** В Табл. 6 приведены результаты расчета, где взяты 11 вариантов диаметра прутков от 10 до 200 мм. В экспериментах с шихтой частота контура варьируется примерно от 0.6 до 0.9 кГц. Мощность обеспечивается в окрестности значения  $P_1=263$  кВт в соответствии с Табл. 3.

Табл. 6. Минимальная загрузка тигля, напряжение 700В, длина прутков 40см, температура 600°C

Параметр	Ед.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Диаметр прутка	мм	10	12	15	20	25	30	40	60	90	117	200
Число прутков	–	200	150	67	32	20	15	9	5	3	2	1
Коэф. заполнения	–	0.2	0.21	0.15	0.125	0.122	0.13	0.14	0.18	0.24	0.27	0.39
Вых. мощность	кВт	197	237	262	265	262	266	259	260	269	260	267
Частота контура	Гц	745	761	802	827	837	842	851	859	869	875	895

В 1-ом и 2-ом столбцах представлена самая мелкая шихта, диаметры 10 и 12 мм, где мощность не обеспечивается заданной (поля выделяются розовым цветом). Увеличение числа прутков не дает эффекта – мощность не растет. Это объясняется тем, что с ростом числа прутков действуют два взаимно направленных эффекта. С одной стороны, растет объем загрузки, что способствует повышению мощности, но с другой стороны, одновременно растет поверхность прутков, длина пути тока и электрическое сопротивление, влияющее на уменьшение тока. Также с ростом поверхности прутков в большей степени вытесняется электромагнитное поле из области тигля, что также способствует уменьшению мощности. В случае мелкой шихты два эффекта уравниваются. Следовательно, должна использоваться шихта, начиная с диаметра 15 мм – третий столбец.

Для диаметров прутков от 15 до 40 мм минимальная загрузка шихты примерно одинаковая (коэффициент заполнения 0.122..0.15). Самая минимальная загрузка (0.122) относится к диаметру 25 мм – столбец 5. Начиная с диаметра 60 мм и больше, минимально допустимая загрузка увеличивается с ростом диаметра. В пределе, допускается загрузить один прутком диаметром 200 мм и весом  $0.39 \cdot 250 = 97$  кг – столбец 11.

**Задача 2.** Маленькие диаметры 10, 12, 15 мм неинтересны в задаче определения максимальной загрузки, поэтому в Табл. 7 не рассматриваются. Большие диаметры более 50 мм также не рассматриваются, т.к. закономерности больших диаметров становятся уже очевидными при рассмотрении диаметров 40 и 50 мм.

Точки ( $U_e$ ,  $P_e$ ,  $f$ ) в столбцах 4 и 5, где мощность ниже  $1.05 \cdot P_n$ , подчиняются функции токоограничения (23). В столбцах 1, 2, 3 напряжение выше функции токоограничения  $U_e > U_{min}(P_e/P_n, f)$ , поэтому мощность максимальная  $P_e = 1.05 \cdot P_n$ .

Табл. 7. Максимальная загрузка тигля 250 кг, длина прутков 57см, начальная температура 25°C

Параметр	Ед.	1	2	3	4		5	
Диаметр прутка	мм	20	25	30	40		50	
Число прутков	—	179	115	80	45		29	
Время от начала цикла	мин	0	0	0	0	2	0	7.6
Выходная мощность генератора, Рe	кВт	284	285	284	246	269	199	270
Частота контура, f	Гц	592	589	606	635	607	658	732
Напряжение генератора. Ue	В	591	526	487	416	472	358	502

Для малых диаметров 20...30мм обеспечивается максимальная загрузка тигля 250кг при условии максимальной мощности ( $P_e = 1.05 \cdot P_n$ ). Т.е. можно только один раз загрузить тигель, после чего выполнить всю плавку. Полностью исключается провал мощности в начале цикла (см. Рис. 11а),



соответственно увеличится скорость выплавки на 1 тонну стали. Интересно, что для малых диаметров прутков (столбцы 1, 2, 3) характерна весьма низкая частота, минимум порядка 590 Гц (для сравнения минимальная частота «козла» 933Гц). Следовательно, для лучшей адаптации к разнообразным условиям генератор должен быть рассчитан на широкий диапазон частоты от 0.5 до 1 кГц.

При максимальной загрузке 250кг холодными прутками (25°C) диаметром 40мм мощность получается ниже номинальной (246кВт – выделено розовым цветом). Однако после прогрева в течение 2 минут мощность поднимается к номинальной (269кВт).

Аналогично, при максимальной загрузке 250кг холодными прутками (25°C) диаметром 50мм мощность получается ниже номинальной (199кВт – выделено розовым цветом). После прогрева в течение 7.6 минут мощность поднимается к номинальной (270кВт).

Максимальную загрузку 250кг уже нет смысла рассматривать при диаметрах прутков более 50 мм, т.к. растет доля цикла, где мощность не обеспечивается близко к номинальной. При больших диаметрах шихты, придется ее загружать как минимум 2 раза. Интересно, что пучок прутков диаметром более 50 мм дает перегрузку (1/KR) выше, чем «козел» при одинаковой массе.

## 10. Обобщение требований к шихте

По данным Табл. 6 и Табл. 7 можно сделать соответствующие обобщения о нижнем и верхнем пределах загрузки тигля. В этих пределах мощность на выходе генератора должна обеспечиваться близко к номинальной. Ниже даны пределы загрузки тигля, если загрузка первая (исходная). Пределы представляются в процентах от полной массы 250 кг. Пределы перечислены для различных диаметров шихты:

- Загрузка от 12.5% до 100% – диаметр 20 мм.
- Загрузка от 12.2% до 100% – диаметр 25 мм.
- Загрузка от 13.0% до 100% – диаметр 30 мм.
- Загрузка от 14% до 100% – диаметр 40 мм (100% после 2 минут разогрева).

Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

- Выходная мощность генератора обеспечивается близко к номинальной во всем цикле плавки при наличии широких возможностей выбора диаметра и режима загрузки шихты.
- Существуют диаметры шихты (20...40мм), когда загрузку шихты можно сделать всего 1 раз – сразу 250кг (правда, на практике это может быть не всегда удобно из-за трудоемкости слишком плотной упаковки тигля).
- При диаметрах шихты свыше 40 мм потребуется относительно небольшое количество порций шихты (например, 2 порции).

Полученное в разделе 7.2 время полного цикла 37 минут гарантируется с запасом по следующим причинам. Во-первых, при оптимальном диаметре шихты исключается провал мощности в начале цикла, наблюдаемый на Рис. 11а. Во-вторых, термический КПД в модели считался с открытой крышкой тигля перед сливом расплава, хотя на самом деле часть цикла крышка закрыта, и можно ожидать более высокое значение среднего термического КПД. В-третьих, если плавится чугун, то теплосодержание чугуна перед сливом значительно меньше, чем у стали. Ориентировочное время полного цикла 30...35 минут.

## Литература

1. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981.
2. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численное моделирование устройств индукционного нагрева. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010, №10, 158 с.
3. Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Чмиленко Ф.В., М'лики Мохамед Амин, Юлегин А.Н. Моделирование индукционных нагревателей с учетом особенностей работы тиристорного преобразователя частоты с параллельным инвертором. – Электричество, 2013, №10, с.52-59.
4. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974.
5. Шиллинг В. Схемы выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты: Пер. с нем.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950, -464с.
6. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы тока. - М.: Изд."Энергия", 1978,-208с., ил.
7. [http://www.aljuel.eu/Archive6/T5M-270-1.0\\_0.5-700-380.pdf](http://www.aljuel.eu/Archive6/T5M-270-1.0_0.5-700-380.pdf)