

Н.Н. ПЕТРОСЯН, Г.С. КАРОЯН

## АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВОК ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы разработки источника питания для установок ионного азотирования, содержащих трехфазный трансформатор, выпрямитель и тиристорно-конденсаторный преобразователь. Методом кусочного припасовывания получены расчетные соотношения для схемы источника питания. С помощью системы OrCAD 9.2 смоделирована принципиальная схема источника и получены ее временные диаграммы. Произведен анализ и дана оценка статических характеристик источника питания.

**Ключевые слова:** ионное азотирование, тлеющий разряд, дуговой разряд, катодное распыление, тиристорно-конденсаторный преобразователь, дозирующий конденсатор.

В последние годы в сфере промышленности интерес к процессам низкотемпературного насыщения железных сплавов азотом или совместно азотом и углеродом сильно возрос.

Важным признаком азотирования является пренебрежимо малая деформация и коробление деталей при низкотемпературной обработке, в ходе которой сталь не претерпевает фазовых переходов, как это имеет место при других видах поверхностного упрочнения (нитроцементации, цементации, индукционной и лазерной закалке и др.) [1].

Широкому распространению метода азотирования препятствовали такие факторы, как трудоемкость технологических процессов, невозможность "глубокого" поверхностного упрочнения, хрупкость поверхностных зон азотированного слоя, резкое ухудшение шероховатости азотированной поверхности, искажение геометрических размеров деталей [2,3].

Процесс ионного азотирования условно разделяют на три этапа: очистка, катодное распыление и насыщение поверхности азотом. Ток в камере достигает номинального значения на этапе насыщения. Максимальное выходное напряжение достигается в режиме катодного распыления. Этот режим по своим характеристикам близок к холостому ходу. На этапе очистки ток нагрузки может существенно превышать номинальное значение.

Широкое внедрение современной электротехнологии в промышленности, т.е. применение новых, высокоэффективных технологических процессов, немислимо без создания специализированных источников питания (ИП). Специфика нагрузки электротехнологических установок, необходимость глубокого регулирования тока, обеспечения работоспособности при переходе тлеющего разряда в дуговой (тлеющий разряд соответствует насыщению поверхности азотом, а дуговой - катодному распылению) и стабильности горения дуги, а также ряд других особенностей предъявляют повышенные

требования к энергетическим и динамическим характеристикам ИП. ИП ионного азотирования должен быть высокодинамичным, обеспечивать нормальную работу установки от режима короткого замыкания до режима холостого хода.

Целью данной статьи является создание новых, высокоэффективных ИП, обеспечивающих устойчивую работу установки ионного азотирования в разных режимах технологического процесса: от режима короткого замыкания до режима холостого хода.

Перечисленным требованиям наилучшим образом отвечают ИП с дозированной передачей энергии. Отличительной особенностью таких ИП является наличие дозирующего конденсатора, включаемого последовательно в цепь нагрузки на этапе передачи энергии, что обеспечивает ограничение передаваемой в нагрузку энергии в периодах модуляции, надежную работу в широком диапазоне изменения тока нагрузки (вплоть до режима КЗ), высокую коммутационную устойчивость в динамических режимах, простоту пуска и отключения, более высокую частоту модуляции по сравнению с импульсными преобразователями с принудительной коммутацией [4].

На рис.1 показана структурная схема рассматриваемого ИП, содержащего трехфазный трансформатор (Тр), выпрямитель (В), фильтр (Ф), тиристорно-конденсаторный преобразователь (ТКП) и нагрузку (Н).

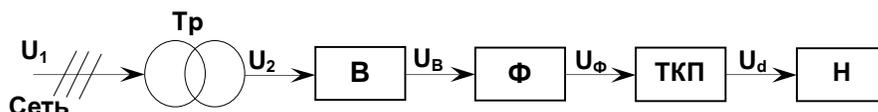


Рис. 1

Соответствующая рис.1 принципиальная схема ИП (рис.2) содержит трехфазный мостовой выпрямитель на диодах VD1...VD6, ТКП на тиристорах VS1,VS2,VS6,VS7 с конденсатором C2 в диагонали, возвратный диод VD10, узел повышения напряжения на тиристорах VS4 и VS5 с конденсатором C3 и цепь рекуперации на диодах VD7, VD8 и тиристоре VS8.

В режиме тлеющего разряда в камере ионного азотирования работают тиристоры дозирующего моста VS1,VS2,VS6,VS7, причем одновременно проводят накрест лежащие вентили (VS1-VS7, VS2-VS6), чем достигается последовательное соединение дозирующего конденсатора C2 с цепью нагрузки на межкоммутационных интервалах. В этом режиме тиристор VS4 находится в открытом состоянии, обеспечивающем подключение камеры ионного азотирования через токоограничивающий реактор L2 к отрицательному выводу ИП.

Для обеспечения в режиме катодного распыления на нагрузке высокого напряжения необходимо открыть тиристор VS5. При этом напряжение на выходе ТКП увеличивается на величину напряжения конденсатора C3, т.е.  $U_{C3}$  (конденсатор C3 предварительно заряжен до уровня U по цепи U - VS3 - C3 - VS5 - U).

Схема рис. 2 смоделирована посредством системы OrCAD 9.2. На схеме модели рис.3а низкоомными резисторами R1...R5 учтены влияния сопротивлений соединительных линий и активные потери на вентиллях.

Посредством генераторов U1...U8 управляющие импульсы подаются на тиристоры, обеспечивающие соответствующий алгоритм работы. Далее использованы следующие обозначения:  $L_n$ ,  $R_n$  - параметры нагрузки;  $U(C2)$  - напряжение на конденсаторе C2;  $U_n$  - напряжение нагрузки. Типы используемых вентилялей и конкретные параметры элементов показаны на схеме рис.3а.

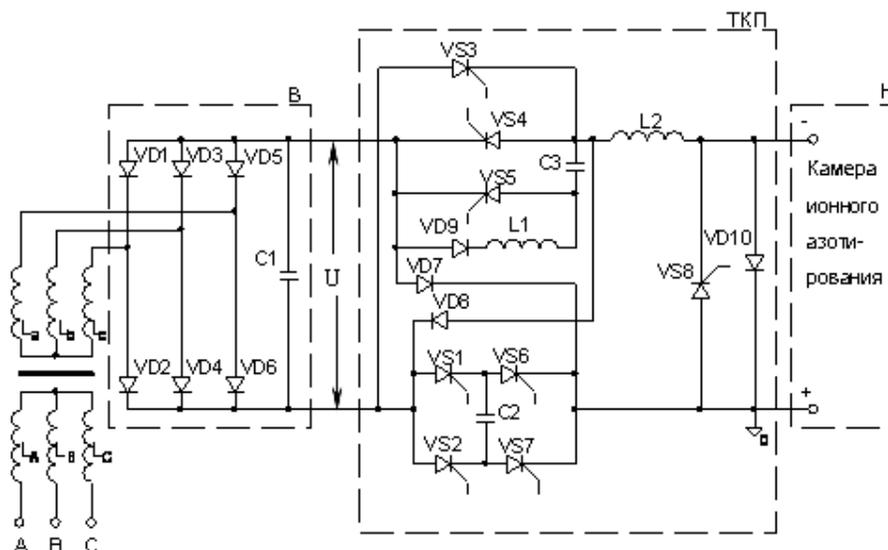


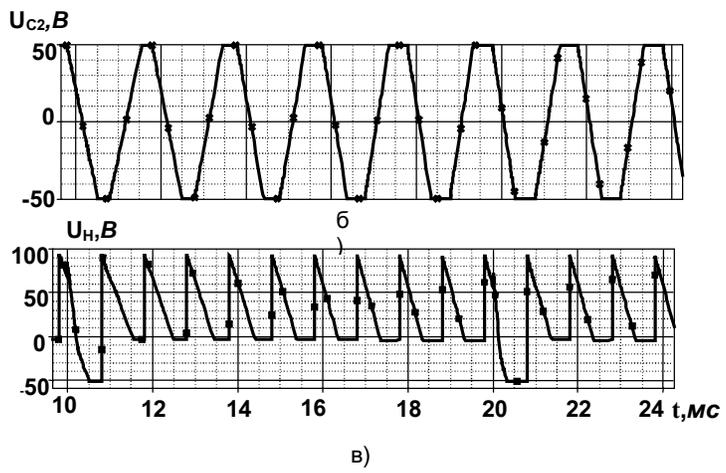
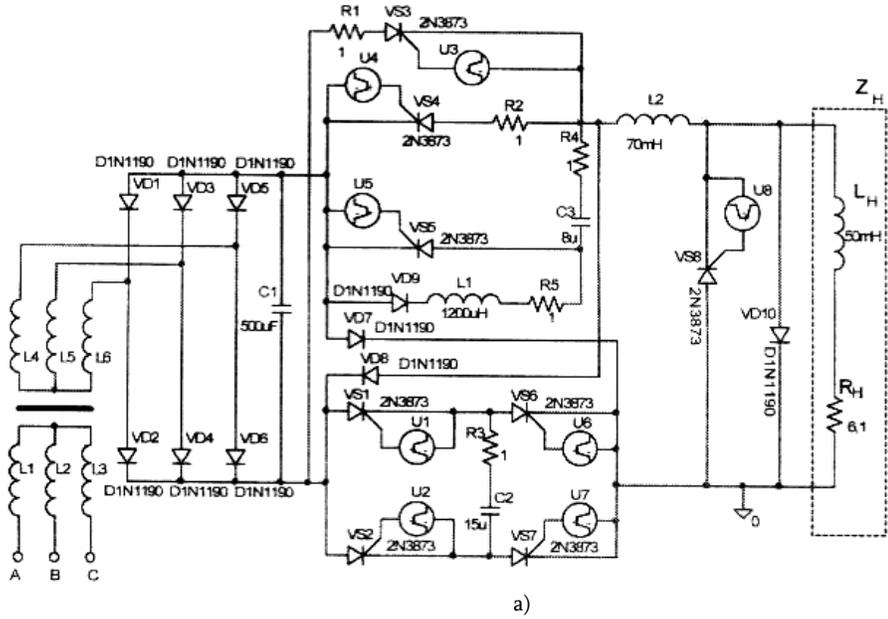
Рис. 2

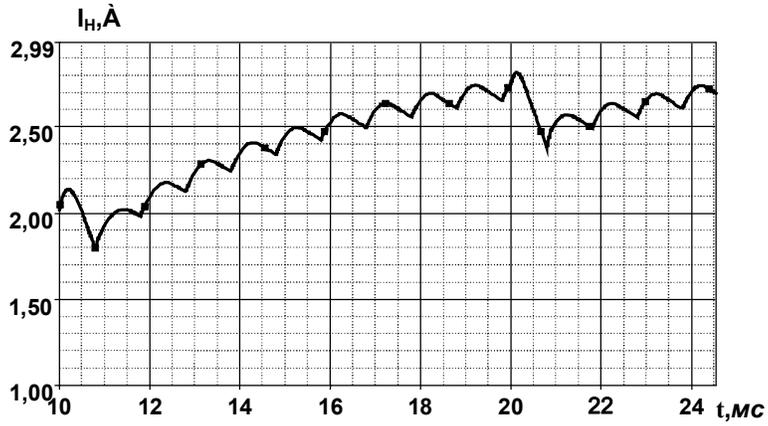
Результаты моделирования представлены на рис.3б-г. Как видно из рисунка, режиму катодного распыления времени соответствует интервал 20...21 мс. На этом промежутке напряжение нагрузки  $U_n$  по абсолютному значению повышается на величину  $U_{C3}=U$  (по сравнению с номинальным значением), а ток нагрузки  $I_n$  снижается (рис.3г).

Сильноточный тлеющий разряд по своей природе является нестабильным, легко переходящим в дуговой под действием ряда возмущающих факторов (колебания давления, загрязнение, неоднородность поверхности обрабатываемых деталей и т.д.). Для обеспечения устойчивой работы в этом режиме в схеме предусмотрен дополнительный тиристор VS8, позволяющий регулировать время горения дугового разряда в камере. В то же время происходит рекуперация энергии, т.е. энергия передается в сеть по цепи L2-VD8 - C1 - VD7 - VS8 - L2, а ток нагрузки замыкается через возвратный диод VD10. После "сброса" энергии и последующей бестоковой паузы, необходимой для восстановления управляющих свойств тиристора VS8, вновь включаются тиристоры VS1,VS2,VS6,VS7 и формируется очередной импульс напряжения на нагрузку.

Для получения статических и регулировочных характеристик анализ ТКП проведен при следующих допущениях: активными потерями на элементах

схемы и пульсациями напряжения на выходе выпрямителя на межкоммутационных интервалах пренебрегаем ( $U = \text{const}$ ); добротность контура тока нагрузки на интервалах перезаряда конденсатора и проводимость шунтирующего диода постоянны; нагрузка активно-индуктивная.





г)

Рис.3

При принятых допущениях в межкоммутационных интервалах справедлива эквивалентная схема рис. 4.

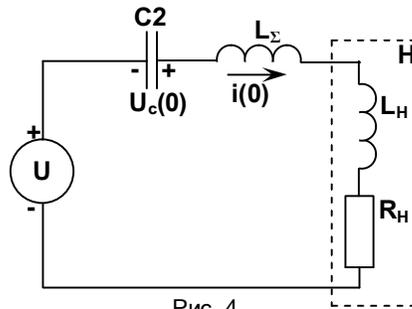


Рис. 4

Дифференциальное уравнение, описывающее электромагнитные процессы в схеме при начальных условиях  $U_c(0)=U$ , имеет вид

$$L_{\Sigma} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C2} \int_0^t i(t) dt + i(t) \cdot R_{\square} = U, \quad (1)$$

где  $L_{\Sigma}$  - эквивалентная индуктивность схемы.

Решая уравнение (1), получаем закономерности изменения тока и напряжения дозирующего конденсатора и тиристоров импульсного регулятора (VS1, VS2, VS6, VS7):

$$i_c(t) = \frac{1}{R_H \sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sqrt{[2(U + U_c(0)) - R_H \cdot i_c^2(0)]^2 + i_c^2(0) \cdot R_H^2 (4Q^2 - 1)} \times \\ \times e^{-\theta/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sin[\theta + \arctg \frac{i_c(0) \cdot R_H \sqrt{4Q^2 - 1}}{2[U + U_c(0)] - i_c(0) \cdot R_H}], \quad (2)$$

$$U_c(t) = \frac{Q}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sqrt{[2(U + U_c(0)) - i_c(0) \cdot R_H]^2 + R_H^2 i_c^2(0) [4Q^2 - 1]} \times \\ \times e^{-\theta/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sin[\theta + \arctg \sqrt{4Q^2 - 1} + \arctg \frac{R_H \cdot i_c(0) \sqrt{4Q^2 - 1}}{2[U + U_c(0)] - R_H \cdot i(0)}], \quad (3)$$

где  $Q = \sqrt{L_{\Sigma}/C2} / R_H$  - добротность контура перезаряда конденсатора;  $\theta = \omega t$ .

Начальные значения тока и напряжения конденсатора определяются в виде

$$i_c(0) = [U + U_c(0)] \cdot \frac{e^{\theta_k/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sin \phi}{Q \cdot R_H \cdot \sin(\theta_k + \arctg \sqrt{4Q^2 - 1} + \phi)}, \quad (4)$$

$$U_c(0) = U \frac{1 - 2A}{1 + 2A}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{e^{\theta_k/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \sin(\theta_k + \arctg \sqrt{4Q^2 - 1} + \phi)}{(\sqrt{4Q^2 - 1} + \operatorname{tg} \phi) \cdot \sin \phi}, \quad (6)$$

$$\phi = \arctg \frac{e^{-\theta_k/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \sin \theta_k}{1 - e^{-\theta_k/\sqrt{4Q^2 - 1}} \cdot \cos \theta_k}, \quad (7)$$

$\theta_k$  - время, соответствующее моменту окончания импульса выходного напряжения.

Оценка статических характеристик преобразователя проводилась с помощью выражений (1)-(7) и по эквивалентной схеме рис.4. По полученным выражениям для напряжения и тока нагрузки оценены статические характеристики преобразователя (регулируемые и внешние характеристики). Последние в безразмерных величинах показаны соответственно на рис.5а и б, где  $U_n = U_n/U$ ,  $f = f/f_6$ ,  $\Gamma_n = I_n/I_{ном}$ , а  $f_6 = 1/T_6 = 1/(2R_H C2)$  - базовое значение частоты модуляции ( $U_n$ ,  $I_n$  - соответственно напряжение и ток нагрузки).

Как видно из рис.5, преобразователь имеет сравнительно жесткие внешние характеристики, что важно при высокочастотных нагрузках, когда необходимо обеспечить стабильность выходного напряжения при изменениях тока нагрузки.

Для преобразователя с возвратным диодом наименьшее значение времени, предоставляемое для восстановления управляющих свойств тиристоров

$t_{\text{в}}$ , достигается при  $Q=0,5$  [2]. Для того чтобы ток нагрузки не превышал  $I_M$  (амплитуда тока при коротком замыкании нагрузки), в любом режиме индуктивность  $L_2$  должна быть выбрана с учетом условий  $U_C(0)=U$  и  $i_n(0)=I_{\text{ном}}$  ( $i_n(0)$ -начальный ток нагрузки). В случае, если  $I_M$  мало отличается от номинального тока, необходимо выбрать емкость  $C_2$  из следующего равенства:

$$C_2 = I_{\text{ном}} t_{\text{в}} / U_C(0). \quad (8)$$

Таким образом, выражения для выбора параметров элементов преобразователя в окончательной форме имеют вид

$$L_2 \geq \frac{2t_{\text{в}} \cdot U}{\ln 2 \cdot \sqrt{I_M^2 - I_{\text{ном}}^2(0)}}, \quad (9)$$

$$C_2 \geq \frac{t_{\text{в}} \sqrt{I_M^2 - I_{\text{ном}}^2(0)}}{\ln[1 + \frac{U_C(0)}{U}](U_C(0) + U)}. \quad (10)$$

Выбрав  $L_2$  и  $C_2$ , легко найти необходимые величины и параметры элементов схемы, обеспечивающие соответствующие режимы работы преобразователя. Прямое и обратное напряжения на тиристорах не превышают напряжения питания. Тиристоры максимально нагружены по току в режиме передачи максимальной мощности в нагрузку. При этом среднее значение тока тиристоров  $VS_1, VS_2, VS_6, VS_7$  оценивается в виде

$$I_{VS_1, VS_2, VS_6, VS_7} = f_{\text{max}} UC_2, \quad (11)$$

где  $f_{\text{max}}$  - максимальная частота модуляции, равная

$$f_{\text{max}} = 1 / 2t_{\text{CX}} = 1 / 2k_3 t_{\text{в}},$$

$t_{\text{в}}$  - паспортное значение времени выключения тиристора;  $k_3$  - коэффициент запаса по времени выключения.

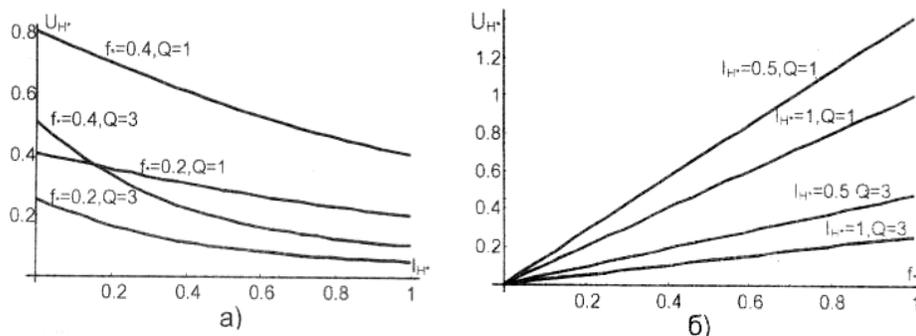


Рис. 5

Для повышения мощности обычно ИП строят по модульному принципу. При этом включают несколько параллельно соединенных ТКП, питающихся от общего выпрямителя, и не требуется дополнительных устройств приравнивания токов модулей, так как для этой цели служит дозирующий конденсатор.

В предложенном ИП за счет использования узла на элементах VS5, VD9, L1 и C3 удается значительно снизить пределы изменения рабочей частоты ТКП, обеспечивая при этом более высокое значение нижней граничной частоты. В итоге удается значительно улучшить массогабаритные показатели в целом, так как реактивные элементы преобразователя рассчитываются для наименьшей рабочей частоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл Ф.- В.** и др. Азотирование и карбонитрирование / Пер. с нем; Под ред. А.В. Супова.-М.: Металлургия, 1990. - 280 с.
2. **Булатов О.Г., Царенко А.Н.** Тиристорно - конденсаторные преобразователи.- М.: Энергоатомиздат, 1982. - 216 с.
3. **Булатов О.Г., Царенко А.И., Поляков В.Д.** Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии.-М.: Энергоатомиздат, 1989. - 200 с.
4. Պետրոսյան Ն.Ն., Կարոյան Գ.Ս. Իոնային ազոտացման էլեկտրատեխնոլոգիական կայանքներ // ՀՊՀՀ ուսանողական հրելյանական գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.- Երևան, 2003. - էջ 213-216:

ГИУА. Материал поступил в редакцию 09.03.2005.

**Ն.Ն. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ս. ԿԱՐՈՅԱՆ**  
**ԻՈՆԱՅԻՆ ԱԶՈՏԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՆԱԽԱՏԵՍՎԱԾ ՄԱՍԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐԻ ՍՏԱՏԻԿ ԲՆՈՒԹԱԳԾԵՐԻ**  
**ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ**

Քննարկվում են իոնային ազոտացման տեղակայանքի սնման աղբյուրների հետ կապված հարցեր, որոնք պարունակում են եռաֆազ տրանսֆորմատոր, ուղղիչ և տիրիստորա-կոնդենսատորային կերպափոխիչ: Կտոր առ կտոր փոխանցման մեթոդի օգնությամբ ստացվել են հաշվարկային արտահայտություններ սնման աղբյուրի համար: OrCAD 9.2 ծրագրի օգնությամբ մոդելավորվել է սնման աղբյուրի սկզբունքային սխեման և ստացվել են առավել հետաքրքրություն ներկայացնող կետերի ժամանակային դիագրամները: Կատարվել է նաև կերպափոխիչի ստատիկ բնութագրերի վերլուծություն:

**Առանցքային բաներ.** իոնային ազոտացում, մարմրող պարպում, աղեղային պարպում, կատոդային փոշիացում, տիրիստորա-կոնդենսատորային կերպափոխիչ, դոզավորող կոնդենսատոր:

**N.N. PETROSYAN, G.S. KAROYAN**  
**ANALYSIS AND RATING OF STATIC CHARACTERISTICS OF**  
**SUPPLY SOURCE FOR INSTALLATION OF ION NITROGEN**

The problems of developing the supply source for installation of ion nitrogen containing a three-phase transformer, rectifier, and thyristor - capacitor converter are considered. By an electromagnetic method the piecewise alignment for the design expressions of the supply source are obtained. With the help of OrCAD 9.2 system the basic circuit is simulated and its temporary diagrams are obtained. The analysis and estimate of the static characteristics are conducted.

**Keywords:** ion nitrogen, amber discharge, arc discharge, cathode spraying, thyristor-capacitor converter, dose condenser.