

БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ С ФУНКЦИЕЙ КОНТРОЛЯ ПАРАЗИТНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ

© А. В. Манин, А. В. Юдин, Е. А. Елисеичев

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени
П. А. Соловьева», 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

В статье рассмотрен вопрос контроля паразитных индуктивностей при работе источника питания на высокотемпературный нагреватель. Проведён сравнительный анализ эффективности применения сглаживающих фильтров ёмкостного и индуктивного типов. Показано преимущество фильтров индуктивного типа. Предложена структура высокоэффективного источника питания с функцией контроля паразитных индуктивностей. Определение величины паразитной индуктивности производится при сравнении величины выбросов тока с результатами расчёта по модели активно-индуктивной нагрузки.

Ключевые слова: паразитная индуктивность, низкоомная нагрузка, блочно-модульный импульсный источник питания, ёмкостной фильтр, индуктивный фильтр, AC/DC-преобразователь, вольфрамовый нагреватель, монокристалл

Сведения об авторах: Манин Алексей Васильевич, к.т.н., доцент, manin-rgata@mail.ru; Юдин Алексей Викторович, д.т.н., профессор, judinav@mail.ru; Елисеичев Евгений Александрович, аспирант, eliseichev_e_a@mail.ru

BLOCK-MODULAR SWITCHING POWER SUPPLY FOR HIGH- TEMPERATURE HEATER WITH PARASITIC INDUCTANCE CONTROL

A. V. Manin, A. V. Yudin, E. A. Eliseichev

Federal State-Financed Educational Institution of High Education «P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation
Technical University», 152934, Rybinsk, Pushkina street, 53

The article is devoted to the issue of parasitic inductance management during the power supply to the high-temperature heater. Comparative analysis of the effectiveness of smoothing capacitive and inductive type filters was performed. The advantage of the inductive type filters was shown. The structure of highly efficient power supply with a function of parasitic inductance control was designed. Parasitic inductance measurements were made by comparing the current leakage values with the results of the calculation of the active-inductance load model.

Keywords: parasitic inductance, low-resistance load, block-modular switching power supply, capacitive filter, inductive filter, AC/DC transformer, tungsten heating element, single crystal

Data of author: Manin Alexey Vasilievich, Ph.D., assistant professor, manin-rgata@mail.ru; Yudin Alexey Viktorovich, Sc.D., Prof., judinav@mail.ru; Eliseichev Evgeny Alexandrovich, postgraduate, eliseichev_e_a@mail.ru

Введение

Сегодня выращивание искусственных монокристаллов лейкосапфира является перспективным тенденциозным направлением. Одна из ведущих технологий получения

лейкосапфира – его выращивание методом Киропулоса с помощью специальных ростовых установок. Рост монокристалла – это довольно сложный технологический процесс, поэтому при разработке и проектировании

установок по выращиванию искусственных монокристаллов лейкосапфира необходим тщательный и всесторонний анализ. При формировании слитка монокристалла по методу Киропулоса необходимо передавать стабильную мощность на изменяющуюся низкоомную нагрузку (на вольфрамовый нагреватель конструкции типа «корзина», рис. 1). Важным узлом таких установок является источник питания, обеспечивающий необходимую энергетику процесса роста.

Разрабатываемый источник питания должен обеспечивать высокую точность регулирования и поддержания напряжения на нагревателе, при этом сохраняя стабильный спектр мощности. Учитывая значительные мощности и достаточно длительные технологические циклы (5-7 дней), большое значение имеет снижение потерь в элементах источника. Особенностью технологического процесса является требование к снижению амплитуды пульсаций тока, уровня электромагнитных помех на нагревателе, что обеспечивает наилучшие условия роста монокристалла и соответственно качество выходной продукции [1, 2].

Анализ выходных сглаживающих фильтров

Максимальная электрическая мощность в нагрузке ростовой установки составляет порядка 50-60 кВт, при этом сопротивление

нагревательного элемента (НЭ) может меняться от нескольких до десятка мОм [3]. Тогда в соответствии с формулой мощности:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий через НЭ, R – активное сопротивление НЭ, получим необходимую силу тока:

$$I = \sqrt{P/R}, \quad (2)$$

где P – электрическая мощность, выделяющаяся на НЭ установки.

Например, при омической нагрузке в 2 мОм (процесс формирования були лейкосапфира) величина силы тока составит около 5 кА, а напряжение на НЭ 10 В.

Чтобы реализовать такой процесс передачи электрической энергии потребуются источник питания (ИП) со стандартным выходным напряжением 12 В и током 5 кА, общей мощностью порядка 50 кВт или более. Все это влечёт за собой огромные расходы на разработку и проектирование источника, большие массогабаритные показатели и его неэффективное использование.



Рис. 1

Вольфрамовый нагреватель типа «корзина»

Обозначенную проблему можно решить путём применения блочно-модульного импульсного источника питания (БМ ИИП). На рис. 2 представлена структурная блок-схема единичного силового модуля БМ ИИП [4].

Одним из важных узлов является узел сглаживающего фильтра. Было проведено сравнение ёмкостного и индуктивного выходных сглаживающих фильтров для изменяющейся низкоомной нагрузки. В данном случае нагрузкой такого типа будет НЭ роторной установки.

Основным параметром сглаживающих фильтров является коэффициент сглаживания. Коэффициентом сглаживания называют отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра:

$$S = q_{\text{вх}} / q_{\text{вых}} \quad (3)$$

Коэффициент пульсаций на входе фильтра задаётся требованиями потребителя электроэнергии к питающему напряжению, а коэффициент пульсаций на выходе известен после выбора схемы выпрямления.

Кроме обеспечения необходимого коэффициента сглаживания, к фильтрам предъявляется ещё ряд требований:

- минимальные габариты;
- масса и стоимость;
- отсутствие заметных искажений, вносимых в работу нагрузки;

– отсутствие недопустимых перенапряжений и выбросов тока при переходных процессах;

– высокая надёжность.

На рис. 3 приведена эквивалентная схема ёмкостного сглаживающего фильтра (С-фильтр), состоящая из последовательно соединённых генератора постоянного тока с напряжением U_0 и генератора переменного тока с напряжением $u = U_m \sin \omega t$, ($\omega = 2\pi f$, f – рабочая частота).

Постоянная составляющая выпрямленного тока I_0 не проходит через конденсатор С-фильтра, а замыкается только через цепь нагрузки R_H .

Переменная составляющая выпрямленного тока I_m проходит как через конденсатор, так и через нагрузку.

Для хорошего сглаживания необходимо иметь $X_C \ll R_H$ и отсюда коэффициент сглаживания С-фильтра получается равным:

$$S_C = \omega C R_H \quad (4)$$

Эквивалентная схема простого индуктивного сглаживающего фильтра (L-фильтр) показана на рис. 4.

Для упрощения расчёта предположим, что L-фильтр имеет только индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ ($\omega = 2\pi f$, где f – рабочая частота), а активное сопротивление $R_L = 0$.

Поскольку через обмотку дросселя L-фильтра проходят как переменная, так и

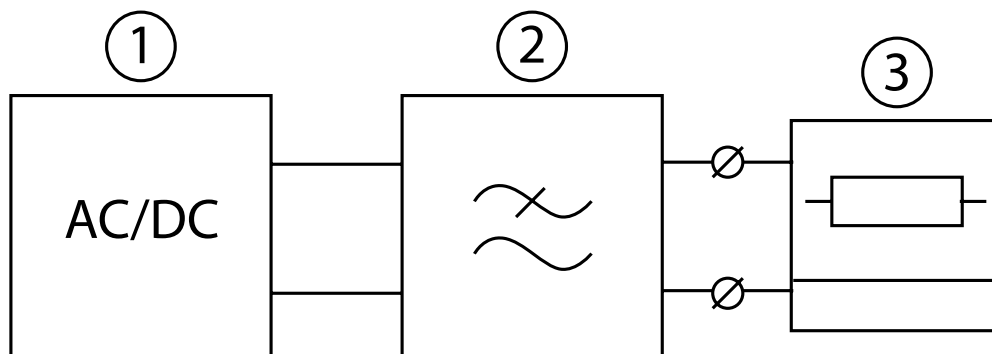


Рис. 2

Блок-схема единичного силового модуля БМ ИИП: 1 – AC/DC-преобразователь, 2 – сглаживающий фильтр, 3 – нагрузка

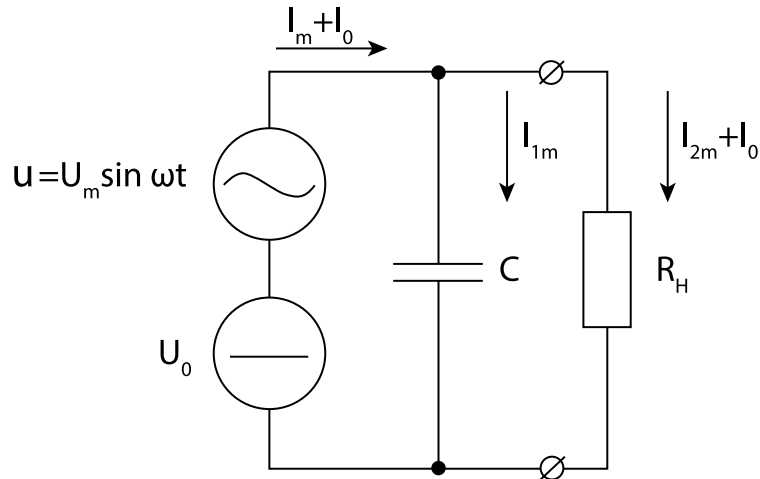


Рис. 3

Ёмкостной сглаживающий фильтр

постоянная составляющие выпрямленного тока, то для уменьшения влияния постоянного подмагничивающего тока сердечник дросселя делают с немагнитным зазором.

Переменная составляющая выпрямленного напряжения создаёт падение напряжения как на индуктивности L , так и на сопротивлении нагрузки R_H .

В этом случае для хорошего сглаживания следует выбирать $X_L \gg R_H$. Тогда при этом условии коэффициент сглаживания L -фильтра будет равен:

$$S_L = \omega L / R_H \tag{5}$$

Например, при коэффициенте сглаживания 10 и омической нагрузке 2 мОм, ёмкость конденсатора C -фильтра согласно (4) будет порядка 16 Ф, а индуктивность дросселя по (5) L -фильтра около 64 мкГн. При такой большой ёмкости (16 Ф) очень трудно подобрать нужный конденсатор, чтобы напряжение на этой ёмкости не менялось при низкоомной нагрузке. Обычно в таких случаях используют дроссели. Они устойчивы к изменениям сопротивления нагрузки и имеют миниатюрные массогабаритные показатели.

Сравнение выражений (4) и (5) показывает, что сглаживающее действие C -фильтра при увеличении сопротивления нагрузки уве-

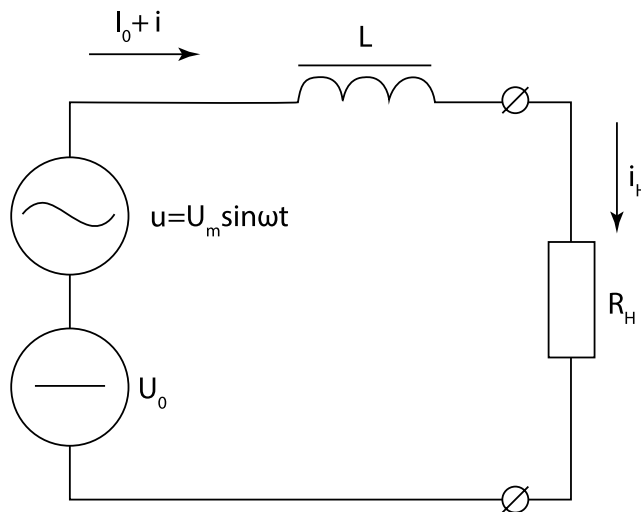


Рис. 4

Индуктивный сглаживающий фильтр

личивается, а L -фильтра уменьшается. Это говорит о том, что для роторных установок при малом напряжении и больших токах нагрузки целесообразно применять L -фильтры.

Контроль паразитных индуктивностей в низкоомной нагрузке

БМ ИИП могут применяться в различных технологических установках, например, там, где необходима передача большой мощности в нагрузку, а также требуются большие величины рабочего тока или напряжения. В частности, использование БМ ИИП для установок выращивания искусственного монокристалла лейкосапфира методом Киропулоса является весьма целесообразным решением. На рис. 5 приведена структура единичного модуля БМ ИИП с системой управления (СУ) и системой защиты (СЗ) [6-8].

В установках для выращивания искусственных монокристаллов лейкосапфира «АПЕКС-М», применяемых на ООО «Рыбинские кристаллы», ИП выполнен по линейной схемотехнике, то есть напряжение питающей сети (по однофазной схеме включения) 220 В 50 Гц поступает на мощный понижающий трансформатор 12 В 5000 А. Симисторный регулятор напряжения, включенный в первичную обмотку силового понижающего трансформатора, формирует ток на НЭ роторной установки.

Передача мощности в нагрузку через силовой трансформатор промышленной частоты 50 Гц не эффективна, вследствие того, что такой большой мощности трансформатор (порядка 60 кВт) является источником сильнейшего магнитного поля рассеяния. Оно искажает спектр мощности на НЭ установки, а также искривляет фронт кристаллизации. С ростом мощности на НЭ возрастают потери от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных деталях трансформатора. Эти потери не только понижают КПД, но и при определённой концентрации создают опасность нагрева стенок камеры трансформатора до высокой температуры. Из-за этих моментов повышается вероятность получения бракованной выходной продукции, резко уменьшается срок эксплуатации НЭ, возникают дополнительные тепловые потери в смежных узлах роторной установки.

На рис. 6 представлена снятая экспериментально характеристика тока на НЭ роторной установки.

Из рис. 6 видно, что нагрузка носит активно-индуктивный характер. На участках 1 и 2 наблюдаются паразитные выбросы индуктивностей, которые обусловлены наличием в составе ИП мощного понижающего трансформатора. Для того чтобы определить величину этих реактивностей, в среде моделирования MATLAB была раз-

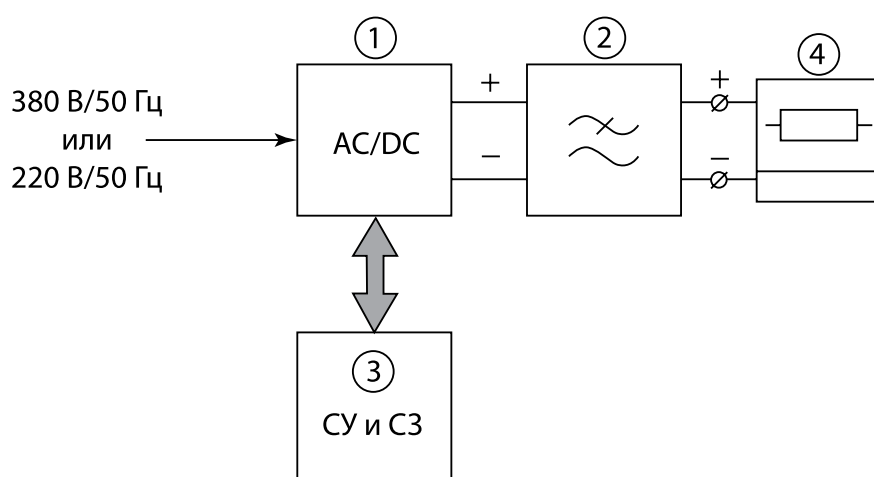


Рис. 5

Блок-схема единичного модуля БМ ИИП с СУ и СЗ:

1 – AC/DC-преобразователь, 2 – сглаживающий фильтр, 3 – система управления и система защиты, 4 – нагрузка

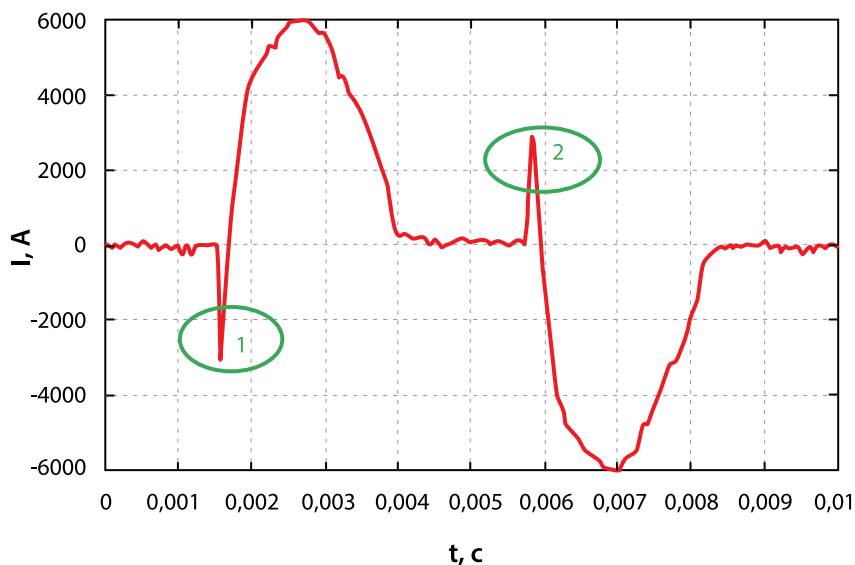


Рис. 6

Ток на НЭ ростовой установке «АПЕКС-М»

работана модель, где методом подбора по идеализированной (снятой экспериментально) характеристике определили величину паразитной индуктивности. В выбросах тока (около ± 3 кА) величина паразитной индуктивности составила порядка 2 мкГн. Для наглядности на рис. 7 приведена смоделированная характеристика тока на НЭ.

Поэтому поддержание и регулирование мощности на НЭ ростовой установки с высокой точностью возможно толь-

ко при учёте паразитных индуктивностей. Импульсные ИП практически лишены таких недостатков в связи с применением технологий высокочастотного переключения и обеспечением хорошей электромагнитной совместимости. В качестве технического решения предлагается разработать модуль БМ ИИП с определением паразитных индуктивностей в нагрузке, применительно к установкам выращивания искусственных монокристаллов лейкосапфира.

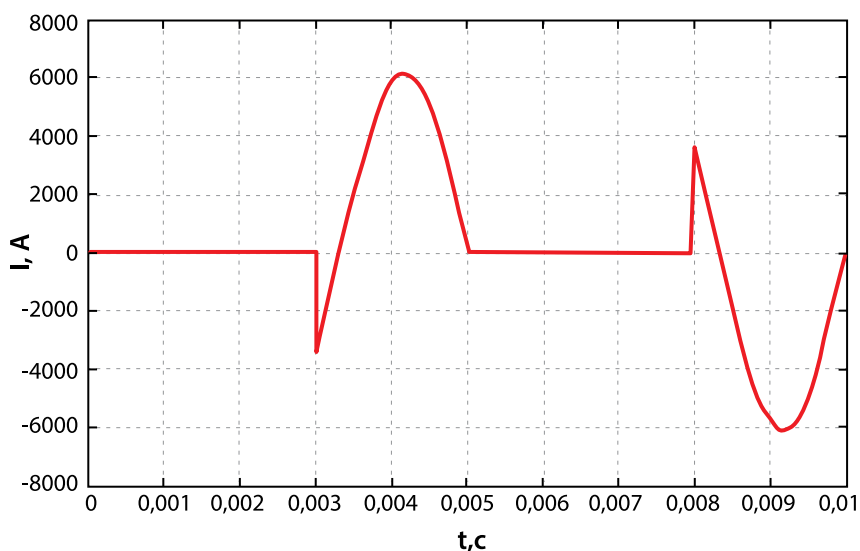


Рис. 7

Смоделированная характеристика тока на НЭ

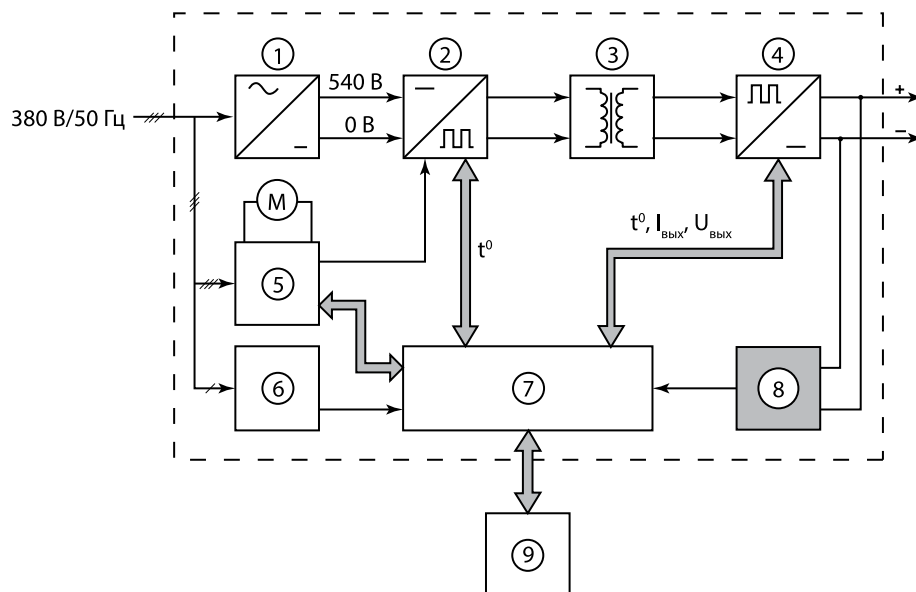


Рис. 8

Функциональная блок-схема AC/DC-преобразователя: 1 – активный трёхфазный выпрямитель, 2 – управляемый инвертор, 3 – импульсный высокочастотный трансформатор, 4 – вторичный силовой выпрямитель, 5 – схема анализа сети, 6 – служебный источник питания, 7 – система управления, 8 – блок определения паразитных индуктивностей, 9 – разъём управления

На рис. 8 представлена блок-схема AC/DC-преобразователя с блоком определения паразитных индуктивностей, а также описан принцип работы всего устройства.

Питающее напряжение 3-х фазной сети 380 В 50 Гц поступает на управляемый трёхфазный выпрямитель (1), далее напряжение преобразуется в постоянное, с действующим значением 540 В. Постоянное напряжение поступает на управляемый инвертор (2), который с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразует его в последовательность импульсов с частотой 20-150 кГц и скважностью 0-100 % в зависимости от необходимого выходного тока или напряжения. Далее последовательность импульсов поступает на импульсный высокочастотный трансформатор (3), дальше на вторичный силовой выпрямитель (4), на котором преобразуется в постоянный ток или напряжение.

Схема анализа сети (5), в случаях отклонения напряжения любой из фаз за допустимый предел, пропадания фазы или её перекоса, вырабатывает сигнал отключения, и этот сигнал выключает инвертор (2).

Служебный ИП (6) вырабатывает ряд напряжений (± 15 В, +5 В) необходимых

для питания системы управления (7), за которой закреплены следующие функции:

- стабилизация выходного тока или напряжения;
- управление инвертором (2) в случае аварийных ситуаций (включение/выключение, снижение выходного тока или напряжения при неисправности питающей сети, коротком замыкании);
- управление силовым ключом схемы (5), то есть управление скоростью вращения вентилятора в зависимости от теплового состояния AC/DC-преобразователя (адаптивная вентиляция).

Функцию регистрации и определения паразитных индуктивностей будет выполнять блок 8. Для этого подключим его входы к выходу вторичного силового выпрямителя (4), а выход к системе управления (7).

Заключение

В статье поставлена и проанализирована задача контроля паразитных индуктивностей в низкоомной изменяющейся нагрузке. В качестве низкоомной нагрузки рассматривается вольфрамовый нагреватель конструкции типа «корзина», который

является частью установок для выращивания искусственных монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса. Разработав блок определения паразитных индуктивностей и интегрировав его в состав AC/DC-преобразователя БМ ИИП, будет возможно:

- оптимизировать работу входного управляемого выпрямителя по амплитуде и ширине импульса, учитывая изменения величины паразитной индуктивности;

- оптимизировать параметры защитных цепочек силовых ключей управляемого инвертора;

- диагностировать состояния шинопроводов по соотношению активно-индуктивного сопротивления.

Это позволит добиться уменьшения дефектов в выходном слитке монокристалла, улучшения его некоторых электрофизических свойств, снижения аварийных ситуаций в технологическом процессе.

Литература

1. Юдин А. В. Оценка искривления фронта кристаллизации в расплаве сапфира по спектральному составу мощности нагревателя // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2011. – № 1 (19). – С. 136-141.
2. Юдин А. В. Электромагнитная модель многокомпонентного высокотемпературного нагревателя // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 30-32.
3. Пелецкий В. Э., Бельская Э. А. Электрическое сопротивление тугоплавких металлов: справочник / Под ред. акад. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 96 с.
4. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование. – Киев: «МК-Пресс»; СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2013. – 256 с., ил.
5. Промышленная электроника. Учебник для вузов / А. И. Котлярский, С. П. Миклашевский, Л. Г. Наумкина, В. А. Павленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 284 с.
6. Манин А. В., Юдин А. В., Елисеичев Е. А. Схемотехника источников вторичного электропитания для установок выращивания монокристаллов лейкосапфира // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2015. – № 3 (34).
7. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 2. Силовые электронные аппараты: учебник для студ.

вышш. учеб. заведений / [А. П. Бурман и др.]; под ред. Ю. К. Розанова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.

8. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z: пер. с англ. – Киев: «МК-Пресс», СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2014. – 256 с., ил.

References

1. Yudin A. V. Estimation of sapphire melt crystallization front bending by thermal radiator power spectral distribution. *VESTNIK Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P. A. Soloveva: Sbornik nauchnykh trudov* [RGATA named after P. A. Solovyov Bulletin], 2011, № 1 (19), pp. 136-141.
2. Yudin A. V. Electromagnetic model of the multicomponent high-temperature heater. *Vestnik IGEU*, 2011, № 5, pp. 30-32.
3. Peletskiy V. E., Belskaya E. A. *Elektricheskoe soprotivlenie tugoplavkikh metallov: spravochnik* [The electrical resistance of refractory metals: handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 96 p.
4. Moskatov E. A. *Silovaya elektronika. Teoriya i konstruirovaniye* [Power electronics. Theory and engineering design]. Kiev, MK-Press Publ.; Sankt-Petersburg, CORONA-VEK Publ., 2013, 256 p.
5. Kotlyarskiy A. I., Miklashevskiy S. P., Naumkina L. G., Pavlenko V. A. *Promyshlennaya elektronika. Uchebnik dlya vuzov* [Industrial electronics. A textbook for high schools]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 284 p.
6. Manin A. V., Yudin A. V., Eliseichev E. A. Circuitry of secondary power supply sources for leucosapphire monocrystal growth equipment. *VESTNIK Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. A. Soloveva: Sbornik nauchnykh trudov* [RGATU named after P. A. Solovyov Bulletin], 2015, № 3 (34).
7. Rozanov Yu. K. *Elektricheskie i elektronnye apparaty. T. 2. Silovye elektronnye apparaty* [Electric and electronic devices. T. 2. Power electronic devices]. Moscow, Akademiya Publ., 2010, 320 p.
8. Maniktala S. *Impul'snye istochniki pitaniya ot A do Z* [Switching power supplies: from A to Z]. Kiev, MK-Press Publ.; Sankt-Petersburg, CORONA-VEK Publ., 2014, 256 p.