

В таблице представлены значения коэффициентов пульсации по мощности (k_{np}) для адаптивного и неадаптивного алгоритма. Рассчитанные по выражению (2) показатели демонстрируют превосходство адаптивного АВН, так как чем меньше коэффициент пульсаций, тем меньше сами пульсации.

Значения коэффициентов пульсации по мощности

Интервал освещенности	k_{np}	
	Неадаптивный АВН	Адаптивный АВН
Interval of illumination	Non-adaptive perturbation method	Adaptive perturbation method
1	0,056	0,0097
2	0,014	0,0013
3	0,056	0,0076
4	0,016	0,0037

Литература

1. Характеристики фотоэлектрического модуля Kyocera KC200GT // Kyocera Corporation. – URL: <https://www.solar-electricsupply.com/kyocera-kc200gt-solar-panel-565>
2. Характеристики фотоэлектрического модуля KSM-160 // ООО Квант. – URL: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf
3. Осипов А.В., Шурыгин Ю.А., Шиняков Ю.А. и др. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразова-

телями постоянного напряжения // Доклады ТУСУР. – 2013. – Т. 27. – № 1. – С. 14–19.

4. Донцов О.А. Иванчура В.И. Краснобаев Ю.В., Пост С.С. Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 12. – С. 35–44.

4. Михальченко С.Г., Русский В.А., Семёнов С.М., Орлянский И.П., Halász Sándor. Подход к построению адаптивного алгоритма экстремального регулирования мощности в системе солнечной энергетики // Значения коэффициентов пульсации по мощности. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 102–112.

5. Cuk converter example // Fundamentals of Power Electronics. – URL: http://eas.uccs.edu/~cwang/ECE5955_F2015/PowerElectronics_f2015/ch2/Sects2-4and2-5.pdf

Орлянский Илья Павлович

Магистрант ОЭЭ НИ ТПУ
Эл. почта: orl_1996@mail.ru

Семенов Сергей Михайлович

Ст. преподаватель ОЭЭ НИ ТПУ
Эл. почта: ssm@tpu.ru

УДК 621.311.62

В.О. Оскирко, А.П. Павлов, А.С. Гренадеров, А.Н. Захаров

Новые решения в области электропитания дуальных магнетронных распылительных систем

Приводится описание новых схем электропитания дуальных распылительных систем. В частности, рассматривается схема формирователя биполярных импульсов напряжения сложной формы, позволяющая изменять скорость роста разрядного тока в течение длительности импульса; источник питания с повышенным уровнем выходного напряжения (до ± 1300 В) и возможностью независимой регулировки параметров импульсов положительной и отрицательной полярности; новая система подавления дуг, способная отличать «мягкие» и «жесткие» дуги, правильно реагируя на них.

Ключевые слова: дуальное магнетронное распыление, биполярный источник питания, реактивное магнетронное распыление.

Для получения диэлектрических покрытий на подложках большой площади в промышленных масштабах широко применяются дуальные магнетронные распылительные системы (ДМРС). Их использование позволяет кардинально решить проблемы «потери» анода и образования электрических дуг на катоде, свойственные одиночным магнетронным распылительным системам, работающим на постоянном токе. Дуальная магнетронная распылительная система включает в себя два магнетрона, объединенных общей цепью электропитания переменного тока. Полярность напряжения, прикладываемого к мишеням каждого магнетрона, периодически изменяется, в результате чего обе мишени поочередно выступают в роли катода и анода. Для электропита-

ния ДМРС используют источники питания (ИП), обеспечивающие импульсное выходное напряжение синусоидальной или прямоугольной формы. Для получения сигнала синусоидальной формы применяются резонансные инверторы. На их основе построены мощные системы электропитания (до 200 кВт), обладающие высокой надежностью.

В настоящее время появляется новое поколение ИП ДМРС с возможностью регулировки частоты, длительности и амплитуды биполярных импульсов. Как правило, они обеспечивают форму импульсов, близкую к прямоугольной. Широкий набор регулируемых параметров открывает возможности по управлению свойствами наносимых тонких пленок, такими как кристалличность, морфология, плот-

ность, показатель преломления, внутренние напряжения и т.д. Возможность изменения параметров импульсов позволяет найти оптимальные режимы с точки зрения скорости напыления и энергопотребления и компенсировать различия в скорости выработки материала мишеней, вызванной асимметрией магнетронов ДМРС. В данной работе приводится описание биполярного ИП для ДМРС нового поколения. Рассматривается ряд схемотехнических решений, направленных на увеличение управляемости, стабильности и энергоэффективности процесса дуального магнетронного распыления.

Формирование импульсов напряжения сложной формы для питания ДМРС

Как известно, при одинаковой средней мощности разряда ДМРС характеризуется более высокими импульсными значениями тока и напряжения относительно одиночных МРС, что ведёт к увеличению потерь в силовых элементах преобразователя и вероятности образования электрических дуг. В результате возрастает энергопотребление, снижается надёжность устройства и стабильность процесса распыления. Избежать увеличения амплитудных значений выходного тока и напряжения можно, модифицировав форму выходных импульсов. Такой подход иллюстрирует эпюра, представленная на рис. 1. Повышенное напряжение в начале импульса приводит к увеличению скорости роста разрядного тока. При определенном значении рост тока замедляется или вовсе прекращается, а импульс приобретает трапецидальную форму с плоской вершиной. В результате преобразования формы импульса при одинаковых средних значениях снижаются максимальные значения тока и напряжения в конце импульса.

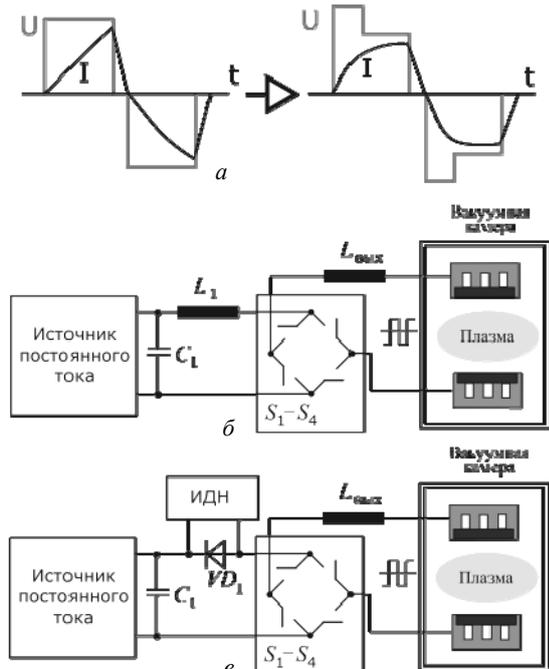


Рис. 1. Эпюра импульсов напряжения и тока на выходе ИП ДМРС – а;
ИП ДМРС с индуктивным накопителем – б;
ИП ДМРС без индуктивного накопителя – в

Для решения этой задачи разработчики используют схемы с индуктивными накопителями [1, 2]. Упрощенная схема представлена на рис. 1, б. Большая индуктивность наделяет ИП свойствами источника тока. Напряжение на выходе изменяется в течение импульса вместе с проводимостью нагрузки. В данной работе предлагается альтернативный вариант – схема без индуктивного накопителя, обладающая свойствами источника напряжения (см. рис. 1, в). На входе схемы располагается первичный преобразователь, обеспечивающий зарядку накопительной емкости C_1 до напряжения 60–650 В. Далее следует инвертор, состоящий из четырех ключей S_1 – S_4 . Между C_1 и инвертором располагается цепь, формирующая дополнительное напряжение в начале импульса. Данная цепь включает в себя источник дополнительного напряжения (ИДН) и параллельный диод D_1 . Схема работает как классический инвертор напряжения, но в начале каждого импульса ИДН формирует дополнительное напряжение. Величина напряжения на выходе ИДН изменяется пропорционально напряжению на C_1 .

На рис. 2 представлены осциллограммы выходных импульсов напряжения и тока при работе ДМРС для двух случаев. В первом случае величина дополнительного напряжения составляла 10% от напряжения накопительной емкости C_1 , во втором – 25%. Средняя выходная мощность в обоих случаях составляла 7,5 кВт.

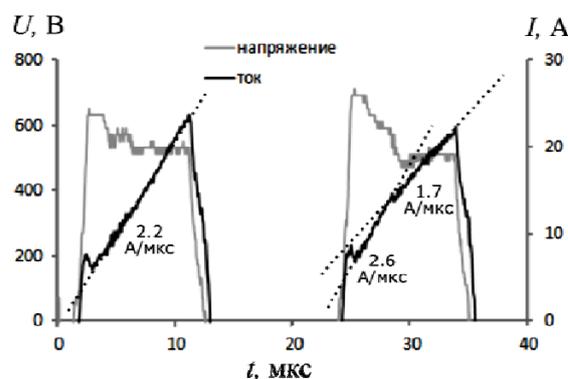


Рис. 2. Осциллограмма выходных импульсов напряжения и тока

При заданных параметрах схемы не удалось достичь формы импульса тока с плоской вершиной, как показано на рис. 1, однако заметно изменение скорости роста тока в течение импульса, обусловленное изменением выходного напряжения. В первом случае скорость роста тока практически постоянна и составляет 2,2 А/мкс, во втором случае она изменяется от 2,6 А/мкс на начальном интервале до 1,7 А/мкс во второй половине импульса. Изменение формы импульса отразилось на значениях тока и напряжения в конце импульса. Максимальные значения тока и напряжения в конце импульса снизились приблизительно на 5%, что обозначает снижение динамических потерь при выключении транзисторов S_1 – S_4 . В результате исследования формы импульсов можно сделать вывод, что для получения

трапецеидальной формы импульсов с плоской вершиной требуется более высокое добавочное напряжение в начальном интервале.

Модульный ИП ДМРС с повышенным выходным напряжением

Независимая регулировка амплитуды и длительности импульсов положительной и отрицательной полярности является важным шагом в развитии технологии дуального магнетронного распыления. Возможность независимой регулировки параметров биполярных импульсов позволяет контролировать скорость распыления каждой мишени. При работе с мишенями из одного материала это может быть использовано для балансировки скорости распыления материала и повышения коэффициента использования материала мишени. При работе с мишенями из разного материала можно контролировать состав покрытий и получать пленки с регулируемым содержанием распыляемых материалов [3, 4].

В работе [5] приводится описание разработанного ранее ИП ДМРС, способного работать в асимметричных режимах дуального магнетронного распыления. Максимальное выходное напряжение данного устройства составляло 650–800 В и ограничивалось предельным рабочим напряжением формирователя выходных импульсов (ФВИ) [6]. Несмотря на то, что ДМРС характеризуется более высоким уровнем рабочего напряжения, относительно одиночных МРС, напряжения 400–800 В вполне достаточно для работы с большинством материалов. Однако некоторые материалы (например, графит), активно используемые для формирования тонкопленочных покрытий, требуют более высокого напряжения для обеспечения необходимой мощности разряда и скорости напыления покрытия. В данной работе представлена модернизированная система электропитания с возможностью независимой регулировки параметров биполярных импульсов и повышенным уровнем выходного напряжения. Её структурная схема представлена на рис. 3.

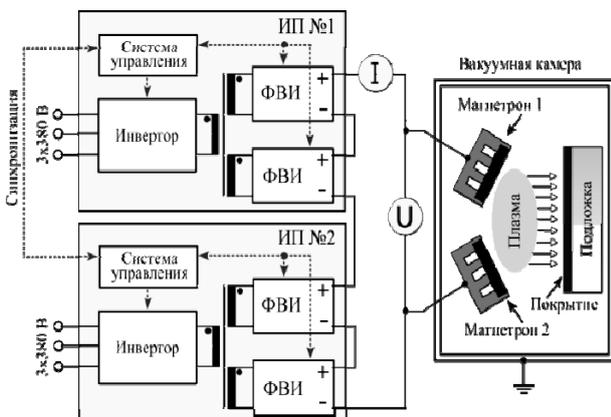


Рис. 3. ИП ДМРС с повышенным выходным напряжением ± 1200 В

Высокий уровень выходного напряжения достигается путем использования нескольких ФВИ. Два ФВИ соединяются последовательно и питаются от одного разделительного трансформатора. В резуль-

тате на выходе модуля обеспечивается повышенное напряжение до 1300 В. ИП ДМРС состоит из двух модулей – М1 и М2. Положительные выходы модулей объединены, а отрицательные подключаются к мишеням ДМРС. В результате на выходе формируется биполярный сигнал. Каждый модуль позволяет управлять амплитудой и длительностью импульсов своей полярности. Для согласованной работы модулей используется канал связи.

На рис. 4 представлена осциллограмма биполярных импульсов в асимметричном режиме на выходе ИП ДМРС с повышенным выходным напряжением.

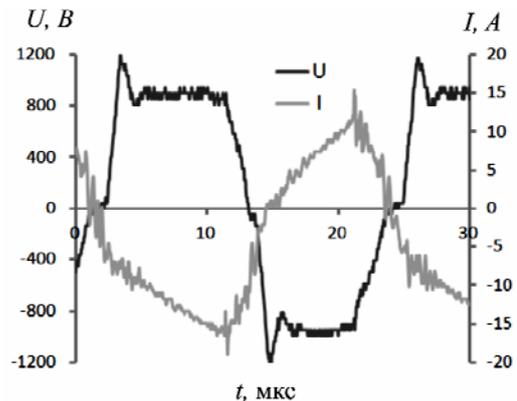


Рис. 4. Осциллограмма выходных импульсов ИП ДМРС в асимметричном режиме

Новая система подавления дуг

Дугообразование на поверхности мишени магнетрона является одной из наиболее сложных проблем, возникающих в процессах магнетронного напыления тонких пленок и покрытий. Особенно ярко эта проблема проявляется при высокоскоростном осаждении покрытий в среде реактивных газов. Основной причиной частого дугообразования является образование диэлектрических слоев на поверхности мишени, которые накапливают заряды и провоцируют возникновение пробоев [7]. Значительный прогресс был достигнут благодаря разработке биполярных импульсных ИП, способных компенсировать накапливаемые заряды и ограничивать энергию дуги на уровне 1–5 мДж/кВт [8]. Электрические дуги, возникающие на поверхности мишени магнетрона, можно классифицировать на две основные группы: это «мягкие» и «жесткие» дуги. «Мягкая» дуга гасится в результате кратковременного отключения питающего напряжения (единицы – десятки мкс). Для подавления «жесткой» дуги требуется длительное отключение питающего напряжения (сотни мкс – единицы мс).

Для получения покрытий однородного состава в режимах реактивного высокоскоростного магнетронного распыления требуется поддерживать постоянный уровень мощности разряда и парциальное давление химически активного газа. Частое образование дуг существенно усложняет выполнение данных условий. В течение длительной паузы, необходимой для подавления дуги, временно прекращается

процесс распыления и возрастает парциальное давление газа. Большинство возникающих дуг (99,9%) являются «мягкими», и для их подавления достаточно лишь кратковременного отключения, которое не оказывает существенного влияния на условия, создаваемые в камере. Но ИП должен быть способен отличать «жесткие» и «мягкие» дуги при их детектировании и выбирать подходящую реакцию. В настоящей работе предлагается способ решения этой задачи.

На рис. 5 представлены осциллограммы, демонстрирующие работу новой системы подавления дуг. В случае перехода магнетронного разряда в дуговую форму происходит резкое увеличение проводимости разрядного промежутка, что сопровождается резким увеличением выходного тока. Система детектирует дугу, когда выходной ток достигает порогового значения. В данном случае оно составляет 40 А. ИП отключается на короткий промежуток времени (20 мкс), достаточный для подавления «мягкой» дуги, и снова подает выходное напряжение. Если дуга не инициируется снова, т.е. выходной ток не вырастает до порогового значения, ИП быстро возвращается в исходное состояние, как показано на рисунке, и возобновляется процесс распыления. Если же дуга образуется снова (рис. 6), ИП идентифицирует дугу как «жесткую» и формирует продолжительную паузу (0,1–10 мс).

Таким образом, ИП отличает «жесткие» и «мягкие» дуги и не формирует продолжительные паузы в тех случаях, когда в этом нет необходимости.

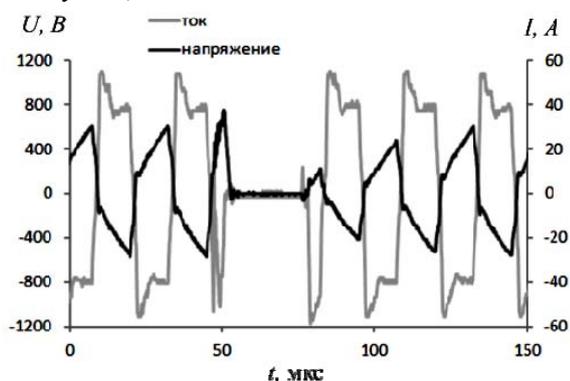


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выходе ИП ДМРС в случае возникновения «мягкой» дуги

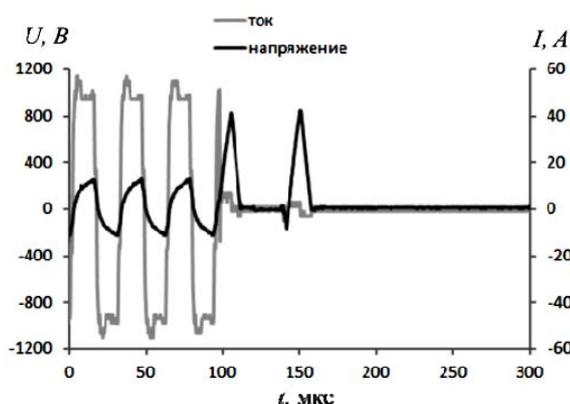


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выходе ИП в случае возникновения «жесткой» дуги

Выводы

Основные результаты, полученные при выполнении данной работы:

- предложена схема формирования импульсов напряжения сложной формы без индуктивного накопителя, продемонстрирована возможность модифицирования формы импульсов разрядного тока в ДМРС с помощью источника напряжения;
- реализована схема модульного ИП ДМРС с повышенным уровнем выходного напряжения (± 1300 В) и возможностью независимой регулировки амплитуды и длительности биполярных импульсов;
- разработана новая система подавления дуг, отличающая «мягкие» дуги от «жестких» и обеспечивающая нужное время отключения питания разряда.

В данной работе кратко изложены основные принципы построения источников питания ДМРС нового поколения. В дальнейшем планируется проведение более тщательного анализа реализованных схем источников питания для определения влияния предложенных схемотехнических решений на энергоэффективность и стабильность процесса обработки, а также качество получаемых покрытий.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-42-703005.

Литература

1. Patent 5,576,939 U.S., Int. Cl.: H01J37/32; H02M3/28, Enhanced thin film DC plasma power supply / G.N. Drummond (USA). – № 08 / 435211; Publication Date 11.19.1996; Filing Date 05.05.1995. – 10 p.
2. Patent 9,129,776 U.S., Int. Cl.: H05B39/00; Differing boost voltages applied to two or more anodeless electrodes for plasma processing / K.W. Finley, D. Christie, US. – № 13/867,907; Publication Date 8.09.2015; Filing Date 22.04.2013. – 44 p.
3. Christie D. Mid-Frequency Dual Magnetron Reactive Co-Sputtering for Deposition of Customized Index Optical Films / D.J. Christie, W.D. Sproul, D. Carter // 46th Annual Technical Conference Proceedings. – 2003. – P. 393–398.
4. Christie D. Towards More Efficient Dual Magnetron Sputtering (DMS): Strategies for Reducing Cost of Ownership / D.J. Christie, S.B. Larson, U. Krause, D.R. Pellemounter // 57th Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL May 3–8. – 2014. – P. 127–129.
5. Оскирко В.О. Источник питания для симметричного и асимметричного дуального магнетронного распыления / В.О. Оскирко, В.А. Семенов, А.П. Павлов // Изв. вузов. Физика. ТГУ. – 2015. – Т. 58, № 9/2. – С. 227–229.
6. Патент на полезную модель 152 232.У1 РФ, МПК Н 01 J 37/32. Биполярный источник питания для магнетронных распылительных систем / В.О. Оскирко, А.П. Павлов, А.А. Соловьев, С.И. Еньшин, В.А. Семёнов (РФ). – № 2 014 137 348 / 07; заявл. 15.09.2014; опубл. 10.05.2015. – Бюл. № 13. – 2 с.
7. Anders A. Physics of arcing, and implications to sputter deposition // J. Thin Solid Films. – Elsevier Science SA. – 2006. – Vol. 502. – P. 22–28.
8. Blattner M. High Power RF and MF Systems for Sputter Applications in Flat Panel Display Production / M. Blattner, D. Ochs, T. Rettich, P. Wiedemuth // 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau. – 2006. – 11–15 September.

Оскирко Владимир Олегович
Канд. техн. наук, науч. сотр. ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: oskirkovo@gmail.com

Гренадеров Александр Сергеевич
Инженер ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: zare17@yandex.ru

Павлов Артем Павлович
Инженер ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: APELTom@yandex.ru

Захаров Александр Николаевич
Канд. техн. наук, науч. сотр. ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: zare17@yandex.ru

УДК 622.236.72

П.П. Ананьев, В.В. Аржанов, К.В. Аржанов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев

Разработка аппарата магнитно-импульсной обработки руды

Рассматривается создание аппарата магнитно-импульсной обработки для разупрочнения руд для горно-обогатительной промышленности.

Ключевые слова: руда, разупрочнение, магнитно-импульсная обработка.

Одним из новых способов разупрочнения железной руды, обеспечивающих повышение экономической эффективности процесса обогащения, является обработка магнитным полем (магнитно-импульсная обработка) [1]. Процесс основан на использовании электромагнитного поля большой напряженности для обеспечения снижения прочности на границах срастания рудной и нерудной фаз. Это обеспечивает создание в рудном материале большого количества дефектов, которые позволяют сократить энергозатраты на процесс измельчения. Процесс измельчения железорудного сырья является весьма энергозатратным – порядка 55–60% энергопотребления от общих затрат железорудных горно-обогатительных комбинатов [2]. Магнитно-импульсная обработка (МИО) является стадией, обеспечивающей подготовку руды к измельчению в мельницах. Аппарат магнитно-импульсной обработки руды монтируется на рудной течке либо на пульпопроводе, подающих железорудное сырье в мельницу.

Разработан аппарат магнитно-импульсной обработки руды, принцип действия которого основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью управляемого ис-

точника питания, цифрового блока управления, высокочастотного и низкочастотного тиристорных преобразователей в энергию магнитного поля в высокочастотном и низкочастотном индукторах. На рис. 1 приведена функциональная схема аппарата магнитно-импульсной обработки руды. Аппарат магнитно-импульсной обработки руды состоит из двух шкафов: шкаф питания и шкаф накопителя. Шкаф питания (степень защиты IP 20) включает в себя: защитный автомат, сетевой фильтр, магнитный пускатель, ограничитель перенапряжения, высоковольтный источник питания «ГОРН» [3], LC-фильтр, цифровой блок управления, пульт управления. Шкаф накопителя (степень защиты IP 55) включает в себя два блока накопительных конденсаторов; тиристорный преобразователь низкочастотный; тиристорный преобразователь высокочастотный. Тиристорный преобразователь низкочастотный создает низкочастотные колебания тока в индукторе за счет разряда накопленной энергии в конденсаторах общей емкостью 600 мкФ. Тиристорный преобразователь высокочастотный создает высокочастотные колебания тока в индукторе за счет разряда накопленной энергии в конденсаторах общей емкостью 60 мкФ.

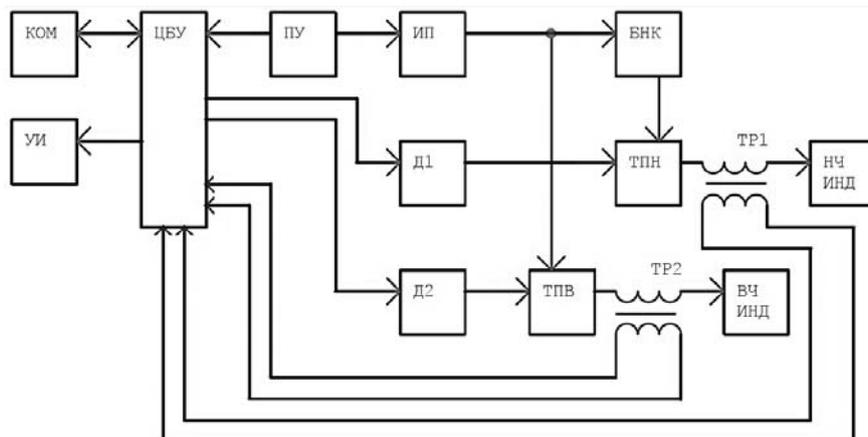


Рис. 1. Функциональная схема аппарата магнитно-импульсной обработки руды