

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“



Дипломна работа
За придобиване на образователно-квалификационна
степен Магистър

Разработване на протокол за контрол на качеството при
ЯМР: клинични резултати и оценка на качеството на ЯМР
изображения от български лечебни заведения

Жанет Руменова Милушева

Факултетен номер: 8PH3500029
Специалност: Медицинска физика

Научен ръководител: Д-р Георги Георгиев,
Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“

Научен консултант: Доцент Д-р Красимир Митев,
Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“

Физически факултет
София
2026г.

Благодарности

Бих искала да изразя своята благодарност към всички, имащи принос за написването на настоящата дипломна работа.

На първо място, съм изключително благодарна на своя научен ръководител – Д-р Георги Георгиев, за неговата отдаденост, толерантност и експертно съдействие през целия период на написването ѝ.

На второ място, благодаря на Д-р Емил Георгиев за това, че осигури фантома, използван за направата на конкретните измервания, както и за споделения практически опит.

На последно място, съм благодарна на цялото си семейство, най-вече на Станислав Велков за търпението и емоционалната му подкрепа.

СЪДЪРЖАНИЕ

Благодарности	1
Използвани съкращения	3
1. Увод	4
1.1 Магнитно-резонансната томография.....	4
1.2 Необходимост от контрол на качеството на ЯМР скенери в България.....	6
1.3 Обосновка, ползи и цели на настоящото изследване	7
2. Материали и методи.....	8
2.1 Таблица на апарати и лечебни заведения в които са направени измервания	8
2.2 ЯМР Фантом - характеристики	9
2.3 Протокол за КК на ЯМР скенер приложим в България	10
Тестове за безопасност	13
Механични тестове	16
Тестове за качество на образа	17
3. Резултати.....	30
3.1 Резултати от измерване проведено в ДКЦ Софиямед ЕООД	30
3.2 Резултати от измерване №1 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Signa HDxt, GE 1.5T).....	34
3.3 Резултати от измерване №2 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Magnetom Skyra, Siemens 3T).....	37
3.4 Резултати от измерване №3 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Magnetom Sola, Siemens 1.5T).....	41
3.5 Резултати от измерване проведено в Университетска Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител”	45
4. Дискусия	48
4.1. Обща оценка на приложимостта на разработения протокол	50
4.2. Анализ на тестовите за безопасност и механична функционалност.....	51
4.3. Геометрична точност и възпроизводимост на пространственото представяне	52
4.4. Висококонтрастна пространствена разделителна способност	53
4.5. Точност на дебелината на среза	54
4.6. Точност на позицията на среза.....	54
4.7. Равномерност на интензитета на изображението.....	55
4.8. Percent Signal Ghosting Ratio	56
4.9. Нискоконтрастна детектируемост и анализ на неуспешен тест от КК при Magnetom Sola	56
4.10. Анализ на артефакта при Magnetom Essenza	58
4.11. Сравнение между 1.5 Т и 3 Т системите	59
4.12. Значение на установените несъответствия за клиничната практика	59
4.13. Методологични ограничения на изследването	60
4.14. Практическо значение и възможности за развитие в България.....	61
4.15. Обобщена интерпретация.....	62
5. Заключение	63
6. Библиография	64
7. Приложение №1 – Приет за постер-презентация доклад в European Congress of Medical Physics, Valencia, Spain 2026.....	66

Използвани съкращения

ЯМР	Ядрено магнитен резонанс
КК	Контрол на качеството
ГНР	Граници на нормална работа
ГБР	Граници на безопасна работа
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i> – магнитно-резонансна томография
MR	<i>Magnetic Resonance</i> – магнитен резонанс
ACR	<i>American College of Radiology</i> – Американски колеж по радиология
B₀	Основно статично магнитно поле
B₁	Радиочестотно магнитно поле
CNR	<i>Contrast-to-Noise Ratio</i> – съотношение контраст/шум
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>
FOV	<i>Field of View</i> – зрително поле, поле на изобразяване
LCOD	<i>Low-Contrast Object Detectability</i> – детектируемост на нискоконтрастни обекти
UL	<i>Upper Left</i> – горе вляво; направление/група отвори в ACR фантома
LR	<i>Lower Right</i> – долу вдясно; направление/група отвори в ACR фантома
PIU	<i>Percent Image Uniformity</i> – процентна равномерност на изображението
PSG	<i>Percent Signal Ghosting</i> – процентен показател на паразитния „ghosting“ сигнал
QA	<i>Quality Assurance</i> – осигуряване на качеството
QC	<i>Quality Control</i> – контрол на качеството
RF	<i>Radiofrequency</i> – радиочестотен
ROI	<i>Region of Interest</i> – област на интерес
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> – съотношение сигнал/шум
T₁	време на надлъжна, спин-решетъчна релаксация; T ₁ -претеглено изображение
T₂	време на напречна, спин-спинова релаксация; T ₂ -претеглено изображение
TE	<i>Echo Time</i> – време на ехо
TR	<i>Repetition Time</i> – време на повторение

1. Увод

1.1 Магнитно-резонансната томография

Магнитно-резонансната томография е утвърден неинвазивен образен диагностичен метод, който заема централно място в съвременната медицинска практика благодарение на способността си да осигурява висококачествена визуализация на меките тъкани без използването на йонизиращо лъчение [1]. Развитието на метода през последните десетилетия е тясно свързано с напредъка в областта на квантовата физика, електрониката и компютърната обработка на сигнали, което позволява постигане на висока пространствена и контрастна разделителна способност, както и значително разширяване на клиничните му приложения [1], [2].

Физичната основа на метода се базира на явлението ядрен магнитен резонанс, при което ядрата на атомите с ненулев спин, основно протоните във водородните атоми, взаимодействат с външно магнитно поле. При поставяне на обект в хомогенно магнитно поле B_0 , магнитните моменти на протоните се подреждат частично по посока на полето, като формират макроскопска нетна намагнитеност. Това състояние представлява динамично равновесие, което може да бъде нарушено чрез прилагане на радиочестотен импулс с честота, съответстваща на Ларморовата честота [1].

Честотата на прецесия на протоните около магнитното поле се определя от зависимостта:

$$\omega_0 = \gamma B_0, f_0 = \frac{\gamma}{2\pi} B_0,$$

Тази връзка е от фундаментално значение, тъй като определя условията за резонансно възбуждане и ефективно генериране на сигнал. При клинично използваните магнитни полета, например 1.5 T, честотата на възбуждане попада в радиочестотния диапазон, което позволява безопасно взаимодействие с човешкия организъм и ефективно извличане на диагностична информация.

Динамиката на намагнитеността и процесите на възбуждане и релаксация се описват чрез уравненията на Блох [3]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B} + \frac{M_0 - M_z}{T_1} \mathbf{e}_z - \frac{M_{xy}}{T_2} \mathbf{e}_{xy}$$

където $\mathbf{M}$ е векторът на колективната намагнитеност, γ е жиромагнитното отношение, $\mathbf{B}$ е приложеното магнитно поле, членът $\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}$ описва прецесията на намагнитеността около магнитното поле, $(M_0 - M_z)/T_1$ представя възстановяването на надлъжната компонента M_z към

равновесната стойност M_0 с времеконстанта T_1 , а $-M_{xy}/T_2$ описва затихването на напречната намагнитеност M_{xy} вследствие на загубата на фазова кохерентност с времеконстанта T_2 .

Този модел обединява три основни физични механизма – прецесия, надлъжна релаксация (T_1) и напречна релаксация (T_2).

Стойностите на T_1 и T_2 варират значително между различните биологични тъкани, което позволява създаването на контраст в ЯМР изображенията. Именно тези различия са в основата на високата диагностична чувствителност на метода и възможността за диференциация между нормални и патологично променени тъкани [1], [14].

Наред с релаксационните процеси, качеството на ЯМР изображението се определя и от параметри като съотношение сигнал/шум (SNR), контраст/шум (CNR), пространствена разделителна способност и хомогенност на сигнала [1], [10]. Тези характеристики зависят от множество фактори, включително параметрите на сканиране (TR, TE), конфигурацията на бобините, както и стабилността на магнитното и градиентното поле. Дори минимални отклонения в тези параметри могат да доведат до значително влошаване на качеството на изображението и съответно до намаляване на диагностичната точност.

В този контекст става очевидно, че високото качество на ЯМР изображенията не е само резултат от физичните принципи на метода, а изисква постоянен контрол и оптимизация на работата на системата. Поради това съвременната практика изисква внедряване на системи за контрол на качеството (Quality Assurance, QA), които да гарантират стабилна и възпроизводима работа на апаратурата [10], [11].

Организации като American College of Radiology разработват стандартизирани протоколи, включващи редовно тестване на ключови параметри чрез използване на специализирани фантоми [4]-[6]. Тези протоколи позволяват обективна оценка на качеството на изображенията и ранно откриване на технически отклонения. Аналогични препоръки са формулирани и от Международната агенция за атомна енергия (International Atomic Energy Agency) и Европейската асоциация по радиология (European Society of Radiology), които подчертават значението на систематичния контрол на качеството и документирането на резултатите [7]-[9].

Въпреки наличието на добре развити международни стандарти, в България липсва детайлно регламентирана нормативна рамка за задължителен QA контрол при ЯМР системите. Това води до вариабилност в практиките и потенциални различия в качеството на извършваните изследвания, което подчертава необходимостта от въвеждане на стандартизирани подходи.

В този контекст настоящата дипломна работа има за цел разработването и прилагането на стандартизиран протокол за контрол на качеството на ЯМР системи, базиран на утвърдени международни практики и използването на ACR фантом.

1.2 Необходимост от контрол на качеството на ЯМР скенери в България

В редица развити държави използването на фантоми е задължителна част от системите за контрол на качеството. Например в САЩ програмите за акредитация изискват всяко лечебно заведение да поддържа документирана QC програма, включваща редовни тестове с фантоми и участие на квалифициран медицински физик. Освен това за получаване и поддържане на акредитация е необходимо периодично предоставяне на изображения от фантоми за оценка на качеството [5], [6].

Европейските стандарти също подчертават значението на такива тестове. Стандартът EN IEC 62464-1 дефинира методи за количествено измерване на основни параметри на качеството на ЯМР изображения чрез използване на фантоми [7]. Тези стандарти са насочени към осигуряване на възпроизводими, обективни и сравними резултати между различни системи и центрове.

В България регулациите, свързани с медицинската апаратура, са фокусирани основно върху устройства, използващи йонизиращи лъчения. За ЯМР, изискванията за контрол на качеството са по-обща - обикновено се изисква извършване на първоначално тестване при инсталация (acceptance testing) и периодична техническа поддръжка, но липсват ясно дефинирани национални стандарти за честота, методология и параметри на QC тестовете, както и задължително използване на стандартизирани фантоми. В резултат на това практиките варират значително между различните лечебни заведения.

Няколко добри причини за въвеждането на стандартизиран протокол за контрол на качеството са:

- Уеднаквяване на стандартите - Използването на стандартизирани фантоми позволява сравнимост на резултатите между различни ЯМР апарати и лечебни заведения. Това е особено важно при проследяване на пациентите във времето.
- Подобряване на диагностичната точност - Ниско качество на изображението (например поради шум, изкривявания или артефакти) може да доведе до неправилна диагноза. QC тестовете позволяват ранно откриване на такива проблеми и тяхното отстраняване.
- Проследяване на дългосрочната стабилност - ЯМР системите могат да променят характеристиките си с времето. Чрез редовни измервания с фантоми могат да се установят тенденции и да се предприемат коригиращи действия.

- Подготовка за бъдещи регулации и акредитация - С оглед на тенденциите в ЕС и света, е вероятно въвеждането на по-строги изисквания за QC при ЯМР. Ранното внедряване на такива практики ще улесни бъдещата акредитация и интеграция в международни стандарти.

1.3 Обосновка, ползи и цели на настоящото изследване

Обосновка и ползи от изследването

ЯМР е един от широко използваните образни методи в съвременната медицина, но за разлика от други образни модалности като компютърна томография и мамография, към момента в България не съществува унифицирана национална практика за рутинен КК при ЯМР системи. В много лечебни заведения дейностите по контрол на качеството се извършват нееднородно и без използване на стандартизирани фантом-базирани методики. Това може да доведе до вариабилност в качеството на образите, намалена възпроизводимост между различни апарати и затруднения при сравняване на резултати между лечебни заведения. Предложеният проект цели да запълни тази липса чрез разработване и внедряване на стандартизиран протокол, базиран на методологията на Американския радиологичен институт (ACR), ЯМР фантом, адаптиран към практическите условия в България. Протоколът предоставя унифицирана рамка за оценка на образа, безопасност и механични тестове по време на сканиране.

Проектът има следните практически ползи:

На първо място, той въвежда възпроизводима и обективна методика за рутинна оценка на работата на ЯМР апаратите.

На второ място, позволява сравнение между различни системи и ранно установяване на отклонения, преди те да окажат влияние върху клиничното качество на образите. Освен това разработеният протокол би могъл да подпомогне хармонизирането на практиките по контрол на качеството на национално ниво.

Основни цели на изследването:

Цел 1: Разработване на стандартизиран QA протокол за ЯМР системи съобразен с нуждите на образната диагностика с ЯМР системи в България

Основна цел на настоящото изследване е разработването на стандартизиран протокол за контрол на качеството при магнитно-резонансни системи, базиран на международно утвърдени методики и адаптиран към условията на клиничната практика. Протоколът има за цел да осигури

възпроизводима и обективна оценка на техническите характеристики на ЯМР системата чрез използване на ACR ЯМР фантом и стандартизирани секвенции за придобиване на изображения.

Стъпки за постигане на тази цел:

- Анализ на международните стандарти и препоръки за контрол на качеството
- Определяне на основните параметри и методики за тяхното измерване
- Стандартизиране на използваните ЯМР секвенции и параметри на сканиране
- Разработване на последователен алгоритъм за провеждане и оценка на QA тестовите

Цел 2: Оценка на основните параметри на качеството на изображението при проведения контрол на качеството.

Извършване на количествена оценка на параметрите, определящи качеството на ЯМР изображението, с цел установяване на съответствието на системата с международно приетите критерии за качество и диагностична надеждност.

Стъпки за постигане на тази цел:

- Придобиване на изображения съгласно стандартизирания QA протокол;
- Извършване на измервания върху основните показатели за качество на изображението;
- Анализ на влиянието на артефактите и техническите отклонения върху резултатите;
- Съпоставяне на получените стойности с референтните критерии за приемливост.

2. Материали и методи

2.1 Таблица на апарати и лечебни заведения в които са направени измервания

В рамките на настоящото изследване са включени ЯМР системи, разположени в различни лечебни заведения на територията на гр. София. Подборът обхваща апарати с магнитно поле 1.5T и 3T, което позволява прилагане на разработения протокол при различни технически конфигурации и условия на клинична експлоатация. Основните характеристики на включените ЯМР системи, включително производител, модел, магнитно поле и лечебно заведение, са представени в Таблица 1.

Марка и модел ЯМР апарат	Магнитно поле	Болнично заведение
Magnetom Skyra, Siemens	3T	УМБАЛ Токуда ЕАД, гр. София
Magnetom Sola, Siemens	1.5T	УМБАЛ Токуда ЕАД, гр. София
Signa HDxt, GE	1.5T	УМБАЛ Токуда ЕАД, гр. София
Magnetom Sola Fit, Siemens	1.5T	ДКЦ Софиямед ЕООД, гр. София
Magnetom Essenza, Siemens	1.5T	Първа Градска Болница, гр. София

Таблица 1. ЯМР системи включени в пилотното приложение на разработения протокол за контрол на качеството.

2.2 ЯМР Фантом - характеристики

В рамките на акредитационната програма на American College of Radiology, големият (large) вариант на ACR-фантомите, се използва за оценка на качеството на образите от ЯМР системи (Фигура 1) [4], [5].

Фантомът има цилиндрична форма с размери 148x190 мм и е изработен от акрилна пластмаса, като е херметично затворен. Вътрешността му е запълнена с воден разтвор, съдържащ 10 mM никелов хлорид (NiCl_2) и 75 mM натриев хлорид (NaCl), който осигурява MR сигнал, подобен на този от човешки тъкани. При изпарение на част от разтвора, може да се допълни с дестилирана вода.

Във вътрешността на фантома са интегрирани различни тестови структури, предназначени за оценка на конкретни параметри на образа – висококонтрастна пространствена разделителна способност, точност на дебелината на среза, точност на позицията на среза, равномерност на интензитета на изображението и нискоконтрастна пространствена разделителна способност.

Важна част от изпълнението на протокола за контрол на качеството е позиционирането на фантома, за да се гарантира точност на измерванията [4], [5]. За сканирането, фантомът се поставя в бобината за глава (head coil), като ориентацията му се задава от означенията “Chin” и „Nose” върху него. Прецизното позициониране на фантома се прави посредством лазерите на машината и нивелир.

В сагитална равнина, фантомът има две двойки клиновидни структури разположени под ъгъл от 45 градуса, които дефинират началната и крайна позиция на 11-те среза, използвани в протокола за QA.



Фигура 1. Общ вид на ACR Large ЯМР фантом, използван за стандартизирано изследване на параметрите на контрол на качеството при ЯМР системи.

2.3 Протокол за КК на ЯМР скенер приложим в България

ЯМР системите са сложни, многокомпонентни устройства, чието правилно функциониране зависи от прецизното взаимодействие между магнитното поле, радиочестотните (RF) импулси и градиентните системи. Малки отклонения в някой от тези компоненти могат да доведат до влошаване на качеството на изображението, което от своя страна може да компрометира диагностичната стойност на изследването. Поради тази причина е необходимо регулярно провеждане на стандартизирани процедури за контрол на качеството, които да гарантират, че системата функционира в рамките на допустимите параметри.

Съгласно препоръките на ACR, част от параметрите се проверяват ежедневно - например централна честота и RF калибровка, други – седмично (геометрична точност, пространствена разделителна способност, ghosting (поява на артефакти) и нискоконтрастна разделителна способност), а по-комплексните измервания и цялостната оценка на системата се извършват ежемесечно или ежегодно от медицински физик. Тази многостепенна система на контрол позволява както бързо откриване на внезапни отклонения, така и проследяване на дългосрочни тенденции в работата на апарата [5], [6].

За провеждането на QA протокола се използва набор от специфични ЯМР секвенции (Таблица 2), които са подбрани така, че да осигурят оптимална визуализация на различните тестови структури във фантома.

Секвенции:

Протоколът за контрол на качеството при ЯМР започва със създаване на необходимите секвенции на всеки един от скенерите участващи в проучването. Таблица 2 показва техническите параметри на тези секвенции. След създаването им и позиционирането на фантома в скенера, се преминава към придобиване на сагитален локализиращ образ, който служи като основна геометрична референтна равнина за планиране на последващите аксиални серии. Въз основа на него се придобиват стандартизирани T1 и T2- претеглени серии с идентични геометрични параметри, което осигурява възпроизводимост и сравнимост на резултатите.

T1 серията, характеризираща се с по-стабилен сигнал и по-добре дефинирани граници, се използва основно за оценка на геометрична точност, пространствена разделителна способност, дебелина и позиция на среза.

T2 серията е по-чувствителна към вариации в интензитета на сигнала и шум и е по-подходяща за оценка на равномерност на сигнала, ghosting артефакти и нискоконтрастна разделителна способност.

В допълнение към стандартизираните ACR серии, при необходимост могат да бъдат включени и клинични (site-specific) протоколи за оценка на качеството на изображението при реални условия на работа.

Серия	Импулсна последователност	TR/TE (ms)	FOV (mm) честотна ос	FOV (mm) фазова ос	Брой срезове	Дебелина на среза (mm)	Междусрезов интервал (mm)	Брой усреднявания	Матрица (честотна ос)	Матрица (фазова ос)	Време за сканиране (min:sec)
ACR Sag localizer	Spin echo	200/20	250	250	1	10	n/a	1	256	256	0:56
ACR Axial T1	Spin echo	500/20	250	250	11	5	5	1	256	256	2:16
ACR Axial T2	**Spin echo	2000/80	250	250	11	5	5	1	256	256	8:56

Таблица 2. Параметри на ЯМР секвенциите използвани при сканиране на ACR фантома. * За ACR сагиталния локалайзер предпочитаната дебелина на среза е 10 mm, но дебелина 20 mm също е допустима. ** За ACR T2 серията се предпочита single-echo spin echo последователност. Допустимо е използването на double-echo spin echo с TR = 2000 ms и TE = 20/80 ms, като при анализа се използват изображенията от второто ехо (TE = 80 ms). Fast/Turbo Spin Echo не трябва да се използва.

След придобиването на изображенията се преминава към количествен и качествен анализ на измерваните параметри. За целите на настоящото изследване е разработен структуриран протокол за контрол на качеството, съобразен с методологията на ACR и адаптиран към

практическите условия на работа в българските лечебни заведения. Протоколът обединява три основни направления: тестове за безопасност, механични тестове и тестове за качество на образа. По този начин оценката не се ограничава единствено до количествените характеристики на ЯМР изображенията, а включва и проверка на основни функционални и експлоатационни характеристики на системата.

Обобщената структура на разработения протокол е представена в Таблица 3.

Тестове за безопасност	
1	Пукнатини в корпуса на скенера
2	Окабеляването на скенера е в изправност
3	Течове около скенера
4	Течове в помещението с оборудването
5	Течове в контролното помещение
6	Паник бутон функционира
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна
9	Аварийните бутони функционират
10	Вентилацията в помещението функционира
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи
Механични тестове	
12	Масата се движи плавно навътре/навън
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу
14	Масата се мести в посока навътре/навън
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу
16	Заклучването на масата работи нормално
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера
21	RF бобините се закрепят стабилно
Качество на образа тестове	

22	Геометрична точност (Geometric accuracy)
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)
25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)
26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)
27	Percent Signal Ghosting Ratio
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)
29	Артефакти (Artifact)
	Липса на артефакти на ACR фантом
	Липса на артефакти на клинични образи

Таблица 3. Обобщена структура на разработения протокол за контрол на качеството при ЯМР, включващ тестове за безопасност, механична функционалност и качество на образа.

В детайли:

Тестове за безопасност

Тестовите за безопасност представляват съществена част от системата за контрол на качеството при магнитно-резонансните изследвания, като тяхната основна цел е да гарантират сигурността както на пациента, така и на медицинския персонал, както и безпроблемната експлоатация на апаратурата. Проверките обхващат както физическото състояние на ЯМР системата, така и функционалността на критичните защитни механизми [8],[12],[13].

Първата група проверки включва визуална инспекция на корпуса на ЯМР скенера и прилежащите към него конструктивни елементи. Оглеждат се външните панели, вътрешната повърхност на тунела, декоративните капаци, защитните решетки и достъпните части около пациентската маса. Търсят се пукнатини, деформации, разхлабени панели, остри ръбове, следи от удар, корозия или други механични повреди. Особено внимание се отделя на зоните, до които пациентът или персоналят имат непосредствен достъп, тъй като повреден елемент може да причини механична травма или да възпрепятства нормалното движение на масата. Визуалният оглед не замества сервизната проверка на вътрешните компоненти, но позволява своевременно да

бъдат идентифицирани видими изменения, които могат да са признак за по-сериозна техническа неизправност.

Паралелно с корпуса се проверява състоянието на достъпното окабеляване. Инспектират се кабелите на радиочестотните бобини, кабелите за пациентски мониторинг, слушалките, комуникационните устройства и останалите периферни принадлежности, използвани в магнитното помещение. Не трябва да се наблюдават нарушена изолация, пречупвания, оголени проводници, притиснати участъци, прекомерно усукване или разхлабени конектори. Кабелите трябва да бъдат разположени така, че да не образуват затворени контури и да не преминават в непосредствен контакт с кожата на пациента, тъй като при радиочестотното възбуждане могат да се индуцират токове и локално нагряване. Проверява се също дали конекторите се свързват стабилно и дали няма видими следи от прегряване или механично износване. Откритите дефекти се документират, а повреденият аксесоар се извежда от употреба до неговото ремонтиране или подмяна.

Следващият елемент от проверката е установяването на течове или наличие на влага около скенера, в техническото помещение и в контролната зала. Оглеждат се подовите настилки, стените, таванът, зоните около климатичните и охлаждащите системи, както и местата на преминаване на тръби и кабелни канали. Наличие на вода, конденз или следи от предходно овлажняване може да създаде риск за електрическите компоненти, да доведе до корозия и да наруши нормалната работа на системата. В техническото помещение се проверяват видимите връзки на охладителните инсталации, като не се извършват действия по отваряне или разединяване на елементи от неквалифициран персонал. При съмнение за теч от охладителна или криогенна система се уведомява сервизният екип и достъпът до засегнатата зона се ограничава.

Съществена част от тестовете за безопасност е проверката на комуникацията между оператора и пациента. Аудиосистемата трябва да осигурява ясно двупосочно предаване на речта от контролната зала към тунела на скенера и обратно. Проверката може да се извърши от двама членове на персонала, като единият се намира при пациентската маса, а другият — на операторската конзола. Оценяват се силата и яснотата на звука, наличието на прекъсвания, смущения или прекомерно фонове бучене. Слушалките и другите средства за слухова защита се оглеждат за механични повреди и се проверява дали могат да бъдат правилно поставени и използвани. Надеждната аудиовръзка е особено важна при пациенти с тревожност, клаустрофобия, ограничена подвижност или състояния, при които е необходимо непрекъснато наблюдение.

Пациентският сигнализиращ бутон, наричан още паник бутон или алармена круша, се проверява преди започване на клиничната работа. Устройството се активира от позицията, в която обичайно се държи от пациента, и се наблюдава дали в контролната зала се задейства съответният

звук и/или светлинен сигнал. Проверява се дали алармата е достатъчно отчетлива и дали може да бъде разпозната незабавно от оператора. Кабелът на бутона трябва да бъде цял, достатъчно дълъг и разположен така, че пациентът да може да го използва без затруднение. При липса на надеждно задействане устройството не трябва да се използва, докато неизправността не бъде отстранена.

Видео системата също подлежи на функционална проверка. Операторът трябва да има непрекъсната видимост към пациента, лицето му и позицията на тялото в тунела, доколкото конструкцията на системата позволява. Проверява се качеството на изображението, осветеността, правилната ориентация на камерата и липсата на закрити участъци. При използване на огледала в бобината за глава се оценяват тяхната цялост, чистота и правилно позициониране. Комбинацията от аудио- и видеонаблюдение дава възможност за ранно разпознаване на тревожност, неволеви движения, затруднено дишане или друга промяна в състоянието на пациента.

Контролът на достъпа до ЯМР помещението е критичен поради постоянното наличие на силно статично магнитно поле. Проверява се състоянието на предупредителните табели, светлинната индикация и обозначенията, указващи ограничен достъп и наличие на магнитно поле. Светлинният индикатор над или в близост до входната врата трябва да бъде ясно видим и да функционира съгласно конфигурацията на конкретната система. Следва да се има предвид, че при повечето ЯМР системи, основното магнитно поле остава активно непрекъснато, включително когато не се извършва сканиране. Поради това предупредителната сигнализация трябва да създава недвусмислена представа, че магнитната опасност е постоянна, а не само по време на изследване.

Когато помещението разполага с електронен контрол на достъпа или интерлок механизъм, се проверява дали системата разрешава влизане единствено на оторизирани лица и дали вратата се заключва и отключва нормално. Проверката се извършва без да се блокира възможността за бърза евакуация при необходимост. Вратата трябва да се движи свободно, да се затваря плътно и да не показва признаци на механично износване.

Проверката на аварийните системи се извършва съгласно инструкциите на производителя и утвърдената процедура на лечебното заведение. Необходимо е ясно да се разграничават бутонът за аварийно изключване на електрозахранването на системата и бутонът за аварийно размагнитване - quench. Последният се използва единствено при изключителни ситуации, при които силното магнитно поле създава непосредствена опасност за живота, например при притискане на човек от масивен феромагнитен предмет. Поради тежките технически и финансови последици реалното активиране на quench бутона не е част от рутинния контрол на качеството. При периодична проверка се оценяват неговата достъпност, обозначение, защитен капак и наличие

на ясни инструкции за употреба. Функционалният тест се извършва само чрез предвидена от производителя тестова процедура или от оторизиран сервизен персонал.

Механични тестове

Механичните тестове са насочени към оценка на функционалността, надеждността и безопасността на подвижните и конструктивните елементи на ЯМР системата. Макар качеството на магнитно-резонансните изображения да зависи предимно от стабилността на основното магнитно поле, градиентната система, радиочестотните компоненти и реконструкционните алгоритми, механичното състояние на апаратурата също има съществено значение за правилното провеждане на изследването. Неизправностите в пациентската маса, фиксиращите механизми, радиочестотните бобини или вратата на магнитното помещение могат да затруднят позиционирането на пациента, да доведат до прекъсване на изследването и в определени случаи да създадат непосредствен риск за пациента или персонала.

Проверките следва да се извършват по стандартизиран контролен лист и при еднакви условия, така че резултатите да бъдат възпроизводими и сравними във времето. По време на всички проверки се наблюдават не само самото движение на механичните компоненти, но и появата на вибрации, прекъсвания, необичайни шумове, забавяне на командите или отклонения от зададената позиция.

Основен елемент на механичната оценка е пациентската маса, тъй като тя осигурява прецизното позициониране на изследвания обект спрямо изоцентъра на магнитното поле. Правилната работа на масата е необходима както за безопасното въвеждане и извеждане на пациента, така и за точното планиране на отделните серии.

На първо място се проверява движението на масата в надлъжна посока, тоест навътре и навън. Масата се придвижва по целия надлъжен ход чрез съответните команди от контролния панел. Движението трябва да започва плавно, без рязко ускоряване, придърпване или забавяне, и да се прекратява контролирано при освобождаване на бутона или достигане на зададената позиция. Наблюдава се дали масата следва правилната посока на командата и дали липсват кратки самоволни премествания след спиране

След надлъжното движение се проверява вертикалното повдигане и спускане на пациентската маса. Този механизъм е от особено значение при преместване на пациенти с ограничена подвижност, пациенти на инвалидна количка или лица, при които е необходимо използването на помощни средства. Масата се придвижва от най-ниската до нормалната работна позиция и обратно, като се наблюдават плавноста на хода, равномерността на скоростта и

стабилността на конструкцията. Не трябва да се установяват внезапни спадове, накланяне, странично разместване или прекомерни вибрации.

Следващият компонент на механичната проверка е вратата на магнитното помещение. Тя изпълнява едновременно функция за контрол на достъпа и част от радиочестотното екраниране на помещението. Вратата се отваря и затваря няколко пъти, като се наблюдава движението на пантите, дръжките, заключващите механизми и контактните повърхности. Движението трябва да бъде плавно и да не изисква прекомерна сила. Не трябва да има провисване, триене в пода, блокиране или самоволно отваряне. Ако е наличен интерлок или електронен механизъм за контрол на вратата, се проверява дали той реагира правилно при отваряне и затваряне. Системата не трябва да възпрепятства аварийното извеждане на пациента. В същото време заключването трябва да предотвратява непреднамерено или неоторизирано влизане в магнитното помещение. Резултатът от проверката се документира отделно, тъй като проблемите с механичната част и с електронния контрол могат да имат различен произход и да изискват намесата на различни специалисти.

Особено внимание се отделя на RF бобините и техните механични елементи. Всяка бобина се оглежда за пукнатини, деформации, разхлабени панели и повреди по заключващите механизми. Подвижните части трябва да се отварят и затварят плавно, без да се прилага прекомерна сила. При бобините за глава, коляно или други анатомични области се проверява дали горната и долната част се свързват правилно и дали заключващите елементи фиксират конструкцията стабилно.

След монтиране върху пациентската маса бобината не трябва да се размества при леко ръчно въздействие или при движение на масата. Проверява се дали всички направляващи елементи са правилно поставени и дали бобината достига предназначенията позиция без контакт с вътрешната повърхност на тунела. Кабелите трябва да бъдат закрепени в предвидените държачи, без да се притискат между подвижни части или да остават свободно висящи. Неправилно закрепена бобина може да се размести по време на сканирането, да причини дискомфорт на пациента или да доведе до промяна в чувствителността и появата на артефакти.

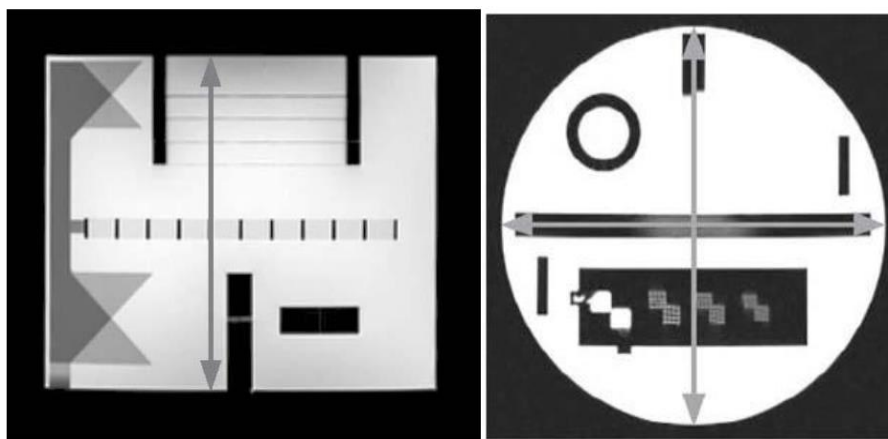
Тестове за качество на образа

Качеството на магнитно-резонансното изображение представлява комплексна характеристика, която отразява способността на системата да възпроизвежда анатомичните структури с висока точност, контраст и минимални изкривявания. То се определя от съвкупното влияние на множество фактори, включително хомогенността на основното магнитно поле, стабилността на радиочестотната система, характеристиките на градиентите и избраните параметри на сканиране. В рамките на стандартизирания QA протокол качеството на образа се

оценява чрез набор от количествени и визуални тестове, които обхващат основни параметри като геометрична точност, пространствена разделителна способност, дебелина и позиция на среза, равномерност на сигнала, съотношение сигнал/шум и наличие на артефакти. Всеки от тези параметри характеризира различен аспект от формирането на изображението, като тяхната съвкупна оценка позволява цялостна преценка за техническото състояние на ЯМР системата [7], [10].

Геометричната точност

Отразява способността на ЯМР системата да възпроизвежда реалните размери на обектите. За измерването, като референтни стойности се използват размерите на фантома - 190x148мм, като допустимите отклонения са +/-3мм (Фигура 2).



Фигура 2. Срез от фантома за проверка на геометричната точност.

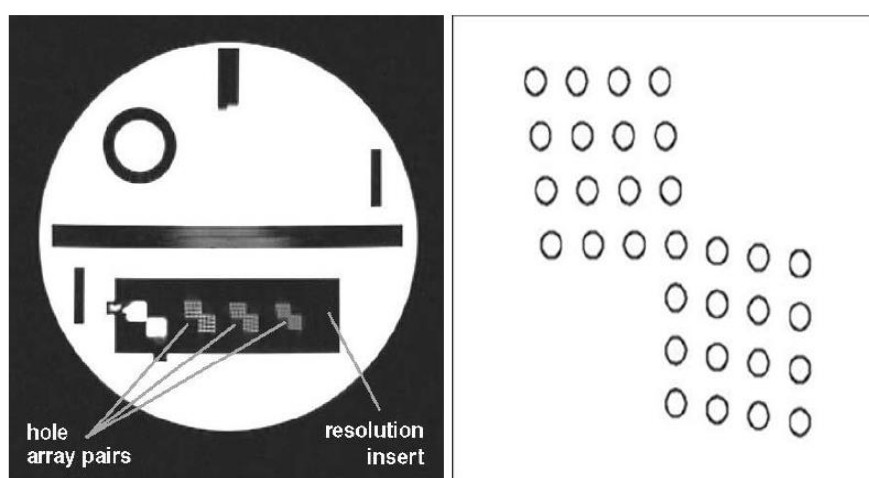
Геометричните изкривявания, могат да възникнат в резултат на различни фактори, включително нелинейност на градиентните полета, нехомогенност на основното магнитно поле (B_0), както и външни магнитни влияния [4], [5].

Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)

Висококонтрастната пространствена разделителна способност описва способността на ЯМР системата да различава малки структури, които се отличават рязко по сигнална интензивност спрямо околната среда. Тя е основно функция на пространствената дискретизация и качеството на градиентната система. Този параметър има съществено значение в клиничната практика, тъй като

определя възможността за визуализация на фини анатомични детайли, като малки съдове, или граници между различни тъкани.

Оценката на висококонтрастната пространствена резолюция в рамките на QA протокола се извършва с помощта на стандартизирани структури, вградени във фантома, които са видими на 1-ви аксиален срез от T1 и T2 секвенциите. Тези структури представляват групи от малки отвори, подредени в матрици с различни диаметри и разстояния между тях (Фигура 3). Типично се използват три групи с размери на отворите приблизително 1.1 mm, 1.0 mm и 0.9 mm, като всяка група е ориентирана в различна посока (хоризонтална и вертикална), за да се оцени резолюцията по двете основни оси на изображението – честотна и фазова [4], [5].



Фигура 3. Обекти във фантома за оценка на висококонтрастната пространствена резолюция посредством броене на групи с отвори с различен диаметър

Методиката на оценка е визуална и се основава на способността на наблюдателя да различи отделните отвори в дадена група, като е важно контрастът да се настрои така, че отворите да бъдат максимално разграничени.

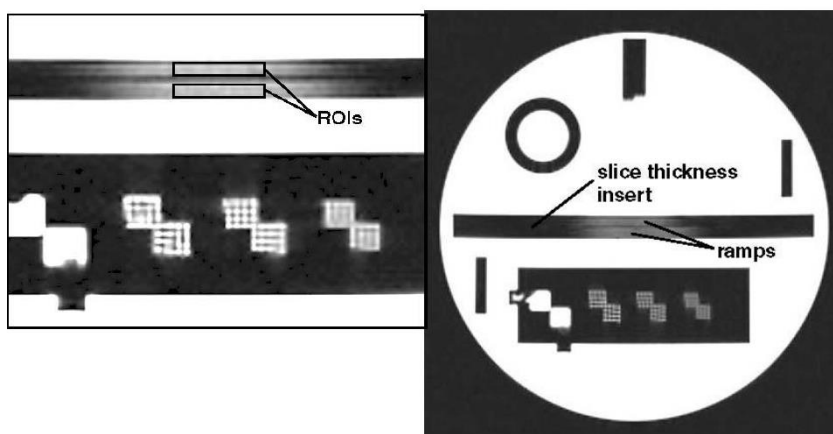
За всяка група се проверява дали всички отвори могат да бъдат ясно идентифицирани като отделни структури, без сливане или загуба на граници. Оценката се извършва както в хоризонтална, така и във вертикална посока, което позволява да се установят евентуални разлики в резолюцията по честотната и фазовата ос. Това е важно, тъй като в ЯМР изображенията често се наблюдава анизотропия на резолюцията, дължаща се на различия в начина на кодиране по двете оси.

Критерият за приемливост, дефиниран от American College of Radiology, изисква системата да може да различи структури с размер най-малко 1.0 mm както в хоризонтална, така и във вертикална посока. Това означава, че всички отвори в групата с диаметър 1.0 mm трябва да бъдат

ясно видими и отделими един от друг. Ако тази група не може да бъде надеждно разграничена, тестът се счита за неиздържан.

Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)

Точността на дебелината на среза определя реалната пространствена резолюция по оста, перпендикулярна на равнината на изображението). Този показател има пряко значение за диагностичната стойност на ЯМР изследванията, тъй като влияе върху степента на частичния обем ефект (partial volume effect), при който различни тъкани с различни сигнални характеристики се усредняват в рамките на един срез. Неточности в дебелината на среза могат да доведат до загуба на детайл, неточно локализиране на лезии и грешки при количествени измервания, което подчертава необходимостта от прецизна и регулярна оценка на този параметър в рамките на QA протокола.



Фигура 4. Определяне дебелината на среза посредством ROI

Методиката за определяне на дебелината на среза се основава на анализ на сигнала от специално проектираните наклонени структури във фантома (рампи), които трансформират триизмерната геометрия на среза в измерима двумерна проекция върху изображението (Фигура 4). За целта се използва първият аксиален срез от стандартната серия, при който тези структури са най-добре визуализирани.

При правилно проведено сканиране, клиновидните елементи се представят като удължени области с повишен сигнал, разположени симетрично в изображението. Тяхната видима дължина е пряко свързана с реалната дебелина на среза. Измерването се извършва чрез поставяне на линейни маркери по протежение на всяка от тези структури, като се обхваща цялата дължина на сигналната зона – от началото до края на ясно различимия сигнал. За повишаване на точността се извършват

две независими измервания, обозначени като L_1 и L_2 , след което се използва тяхната средна стойност.

В ACR методиката дебелината на среза t , се определя чрез съотношението между измерените дължини на сигналните проекции, като се използва следната зависимост:

$$t = 0.2 \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

където L_1 и L_2 представляват измерените дължини на двете клиновидни структури. Тази формула отчита геометрията на фантома и ъгъла на наклон на клиновете, като позволява директно изчисляване на реалната дебелина на среза.

Особено важно условие при извършване на измерването е правилното визуализиране на границите на сигнала. Това се постига чрез подходящо настройване на контраста и яркостта (window/level), така че преходът между сигналната област и фона да бъде ясно дефиниран. Неточното определяне на тези граници може да доведе до систематична грешка, например надценяване на дебелината при включване на зони с частичен сигнал. След изчисляване на дебелината на среза, получената стойност се сравнява с номиналната стойност, зададена в протокола на сканиране. За стандартна дебелина от 5 mm се приема, че резултатът е в допустими граници, ако отклонението не надвишава приблизително ± 0.7 mm [4], [5]. Това означава, че измерената стойност трябва да попада в интервала:

$$4.3 \text{ mm} \leq t \leq 5.7 \text{ mm}$$

При стойности извън този диапазон тестът се счита за неиздържан, което може да бъде резултат от неточности в селекцията на среза, нестабилност на RF импулсите или проблеми с градиентната система.

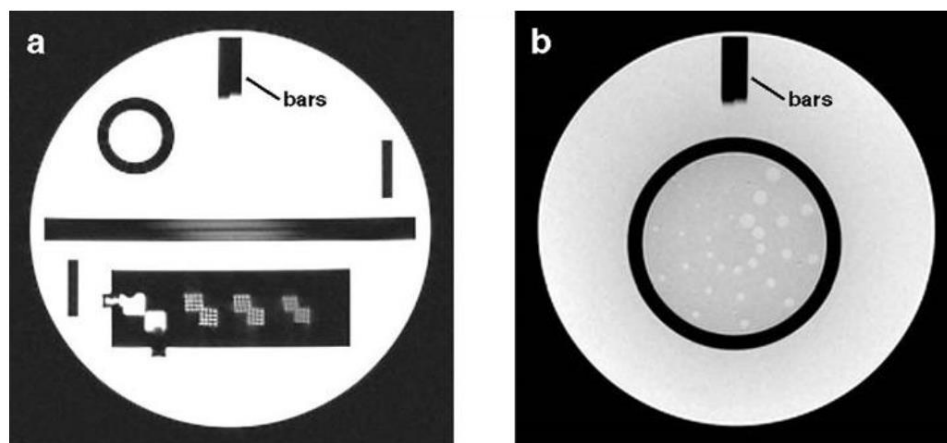
Освен абсолютната стойност на дебелината, при анализа се обръща внимание и на съотношението между L_1 и L_2 . При идеално позициониране на фантома тези две величини трябва да бъдат близки една до друга. Значителна разлика между тях може да индикира наклон на фантома или неправилно центриране спрямо изоцентъра на магнитното поле.

Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)

Отразява способността на апарата да позиционира отделните срезове точно в предварително зададеното пространствено положение. Този показател има съществено значение за клиничната практика, особено при серийни изследвания, проследяване на заболявания и

планиране на терапия, където е необходимо възпроизводимост и точно покриване на анатомични области.

Оценката на точността на позицията на среза се извършва с помощта на двойки клиновидни елементи, разположени в двата края на фантома, които служат като геометрични маркери за началото и края на стандартния набор от аксиални срезове (Фигура 5).



Фигура 5. Геометрични маркери използвани за проверка точността на позиция на среза.

Методиката на измерване се базира на анализ на първия и последния аксиален срез от стандартната серия (съответно slice 1 и slice 11). При правилно позициониране на фантома и коректно задаване на геометрията, клиновидните структури в тези срезове трябва да се визуализират симетрично и с еднаква геометрия. Всяко отклонение от тази симетрия е индикатор за грешка в позиционирането.

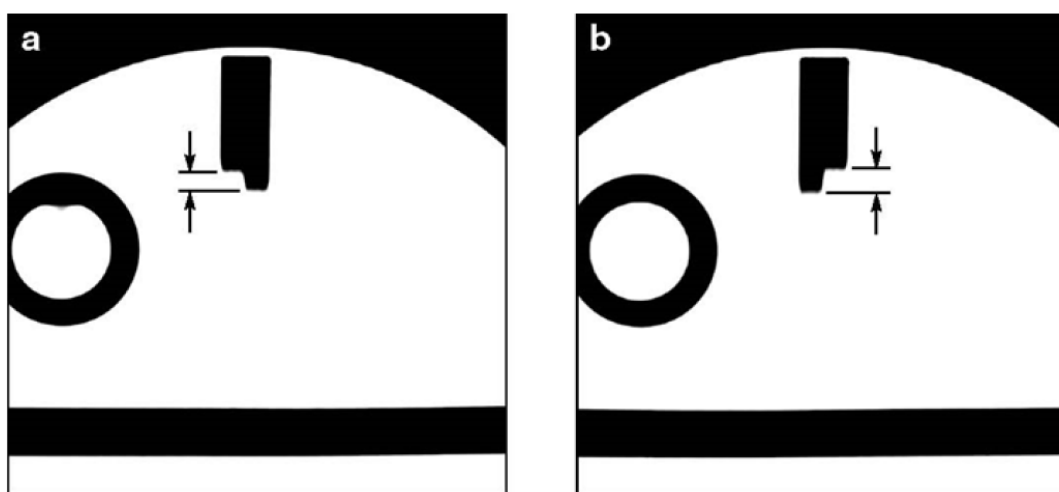
Измерването се извършва чрез определяне на дължините на сигналните проекции на съответните клиновидни структури, обозначени като L_1 и L_2 . Тези дължини се измерват с помощта на линейни инструменти в DICOM софтуер, като се обхваща цялата зона на ясно изразен сигнал. За повишаване на точността е важно измерванията да се извършват при оптимално настройване на контраста, така че границите на сигналните области да бъдат ясно разграничени. Разликата между двете измерени стойности служи като количествена оценка на грешката в позицията на среза. Съгласно ACR методиката, отклонението Δz може да се изрази чрез следната зависимост:

$$\Delta z = 0.5 \cdot (L_1 - L_2)$$

където L_1 и L_2 са дължините на сигналните проекции на съответните клиновидни структури. Тази формула отразява факта, че разликата между двете измервания е пряко пропорционална на отклонението на среза от идеалната му позиция.

Получената стойност на Δz се сравнява с допустимите граници, дефинирани от American College of Radiology. Обикновено се приема, че тестът е успешно преминал, ако отклонението не надвишава ± 5 mm. По-големи стойности показват наличие на систематична грешка в позиционирането, която може да бъде резултат от неточности в калибровката на позициониращата система, грешки при задаване на геометрията или неправилно центриране на фантома.

Освен количествената оценка, при анализа се извършва и визуална проверка на симетрията на структурите. При коректно позициониране, сигналните зони трябва да бъдат приблизително еднакви по дължина и форма. Значителни разлики между тях могат да индикират наклон на фантома или неправилно подравняване спрямо изоцентъра на магнитното поле (Фигура 6).



Фигура 6. Значителни разлики в дължината на клиновидните структури могат да индикират наклон на фантома или неправилно подравняване спрямо изоцентъра на магнитното поле.

Факторите, които влияят върху точността на позицията на среза, включват прецизността на механичната система за позициониране на пациента, стабилността на градиентните полета и точността на RF селекцията на среза. Освен това, човешкият фактор също играе роля, тъй като неправилното позициониране на фантома или пациента може да доведе до систематични отклонения [4], [5].

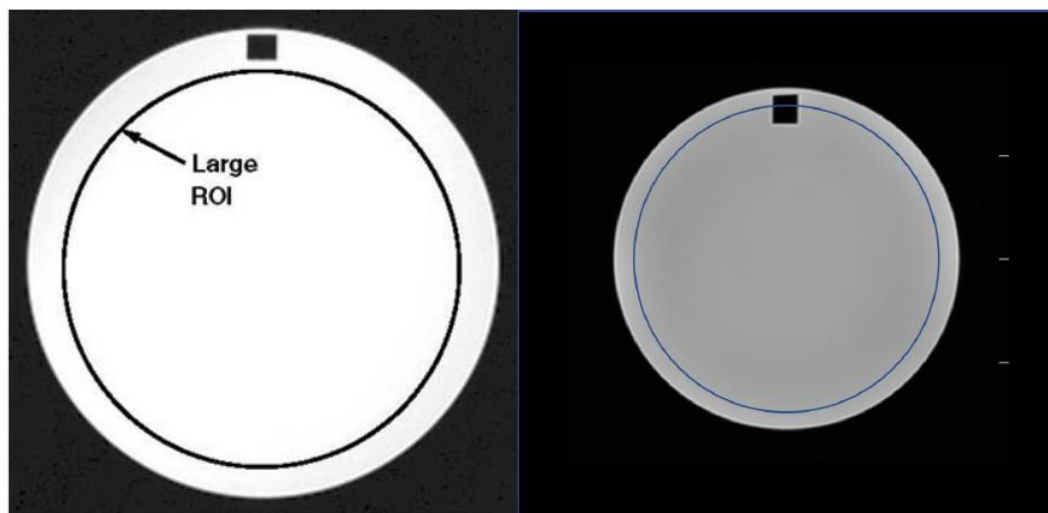
Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)

Равномерността на интензитета на изображението представлява съществен параметър в системата за контрол на качеството при магнитно-резонансната томография, тъй като характеризира способността на системата да възпроизвежда хомогенен сигнал в рамките на обект с еднородни физични свойства.

В идеални условия, при сканиране на хомогенен фантом, сигналният интензитет следва да бъде еднакъв във всяка точка от изображението. На практика обаче се наблюдават вариации, обусловени от нехомогенност на основното магнитно поле (B_0), неравномерност на радиочестотното поле (B_1), пространствената чувствителност на използваната RF бобина, както и от особености в реконструкционните алгоритми. Поради това количествената оценка на равномерността е от критично значение за гарантиране на диагностичната надеждност на ЯМР изображенията.

Измерването на равномерността на интензитета в рамките на QA протокола се извършва върху 7-ми аксиален срез, който е разположен в централната част на фантома. Изборът на този срез е обусловен от факта, че той е най-слабо повлиян от гранични ефекти и осигурява най-представителна оценка на хомогенността на сигнала.

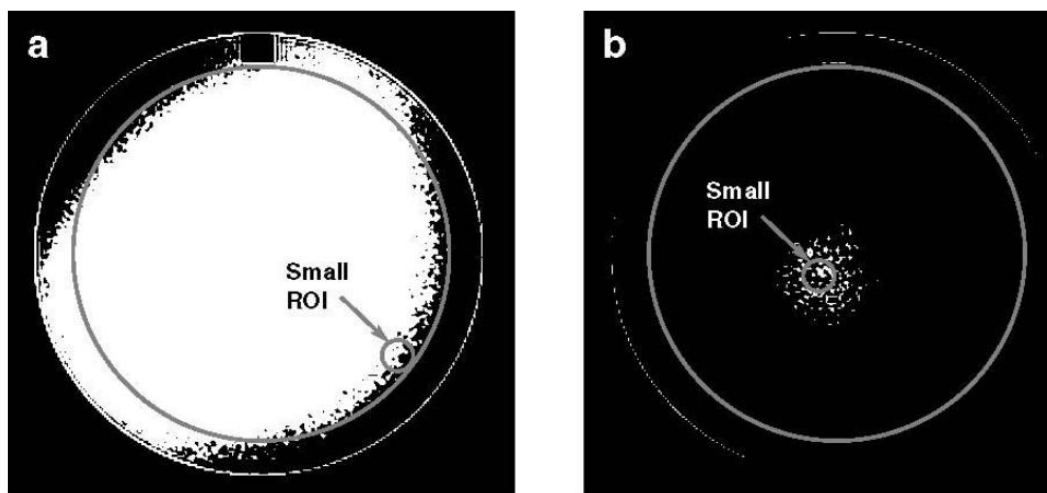
В първия етап от анализа на изображението, се дефинира голяма централна област на интерес (ROI), която обхваща максимално възможна част от вътрешността на фантома, без да включва периферните зони, близки до стените. Обикновено тази област има кръгла форма и се позиционира концентрично спрямо центъра на изображението (Фигура 7). Диаметърът ѝ се избира така, че да бъде приблизително 70–80% от вътрешния диаметър на фантома, което гарантира, че се изключват областите с потенциални гранични нехомогенности. Тази голяма ROI служи като основа за последващия анализ и за определяне на диапазона на сигналните стойности.



Фигура 7. Централна област на интерес в среза която се използва при първи етап на анализ за определяне равномерността на интензитета.

След дефинирането на голямата ROI, се пристъпва към идентифициране на пикселите с максимален и минимален сигнал в рамките на тази област. В повечето съвременни DICOM

анализиращи среди това може да бъде реализирано чрез автоматично извличане на статистическите параметри на ROI, включително максимална (S_{max}) и минимална (S_{min}) стойност на сигнала. Въпреки това, с цел по-голяма прецизност и съответствие с методиката, описана в ръководството на American College of Radiology, често се прилага допълнителна стъпка, при която се използват малки области на интерес (small ROI) – Фигура 8 [4], [5].



Фигура 8. Малки по площ ROI използвани в допълнителна стъпка за определяне на равномерност на интензитета на изображението.

В този подход, след като в голямата ROI бъдат локализирани зоните с най-висок и най-нисък сигнал, върху тези места се позиционират две отделни малки ROI. Тези малки ROI обикновено имат площ от порядъка на няколко десетки пиксела и се поставят така, че да бъдат изцяло разположени в хомогенна област, без да включват граници или шумови артефакти. Едната малка ROI се позиционира върху областта с най-висок сигнал и се използва за определяне на стойността S_{max} , докато другата се поставя върху областта с най-нисък сигнал и служи за определяне на S_{min} . Този двустепенен подход минимизира влиянието на случайни шумови вариации. След определяне на стойностите S_{max} и S_{min} , се изчислява количественият показател за равномерност на изображението – Percent Image Uniformity (PIU), дефиниран чрез следната зависимост:

$$PIU = 100 \times \left(1 - \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \right)$$

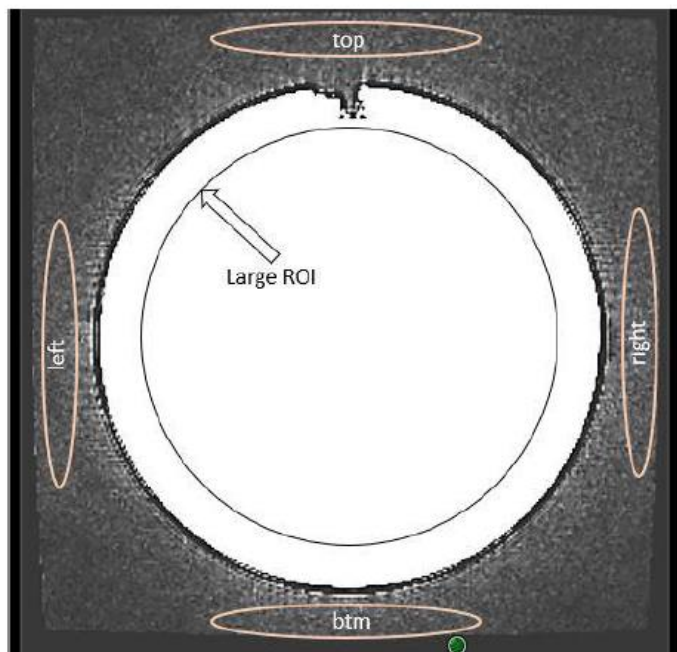
Тази формула изразява относителната разлика между максималния и минималния сигнал, нормализирана спрямо тяхната сума, като резултатът се представя в проценти. Стойности на PIU,

близки до 100%, индикират висока степен на хомогенност, докато по-ниски стойности отразяват наличие на неравномерности в сигнала.

За MRI системи с магнитно поле 1.5 T, тестът се счита за успешно преминал, ако стойността на PIU е равна или по-голяма от 87.5%. При стойности под този праг се приема, че е налице значителна нехомогенност, която може да компрометира качеството на изображението.

Percent Signal Ghosting Ratio

Представява количествена мярка за наличието на т.нар. *ghosting* артефакти в ЯМР изображенията. Тези артефакти се проявяват като повторения на основния обект, разположени в посока на фазовото кодиране, и могат значително да влошат диагностичното качество на изображението. Причините за възникването им са разнообразни и включват нестабилност на градиентните полета, неточности в синхронизацията на RF импулсите, механични вибрации, както и външни електромагнитни смущения. За измерването му също се използва 7-ми срез от аксиалната серия, тъй като осигурява достатъчно голямо поле с хомогенен сигнал.



Фигура 9. Една централна и четири периферни области на интерес използвани при анализ за наличие на *ghosting* артефакти.

Процедурата по измерване включва дефиниране на пет области на интерес (Regions of Interest, ROI) – една централна и четири периферни, разположени извън фантома (Фигура 9). На първия етап се поставя голяма централна ROI в хомогенната вътрешност на фантома. Тази област

трябва да бъде достатъчно голяма, за да осигури представителна стойност на сигнала, но същевременно да не достига до стените на фантома, за да се избегнат гранични ефекти. Обикновено ROI се позиционира концентрично спрямо центъра на изображението.

След това се дефинират четири малки ROI извън фантома – съответно в горната (Top), долната (Bottom), лявата (Left) и дясната (Right) част на изображението. Тези ROI трябва да бъдат разположени в области, където не се очаква наличие на сигнал от фантома, като се избягват зони с видими артефакти или шумови аномалии. Особено важно е ROI да бъдат позиционирани симетрично спрямо центъра и на приблизително еднакво разстояние от него, за да се осигури коректно сравнение. След дефиниране на всички ROI се измерват средните стойности на сигнала в тях. Централната ROI дава стойността S_{center} , която служи като референтен сигнал, докато четирите периферни ROI дават стойности S_{top} , S_{bottom} , S_{left} и S_{right} , които отразяват нивото на ghosting сигнала извън фантома.

Количественият показател PSG се изчислява чрез следната формула:

$$PSG = \frac{(S_{top} + S_{bottom}) - (S_{left} + S_{right})}{2 \cdot S_{center}} \times 100$$

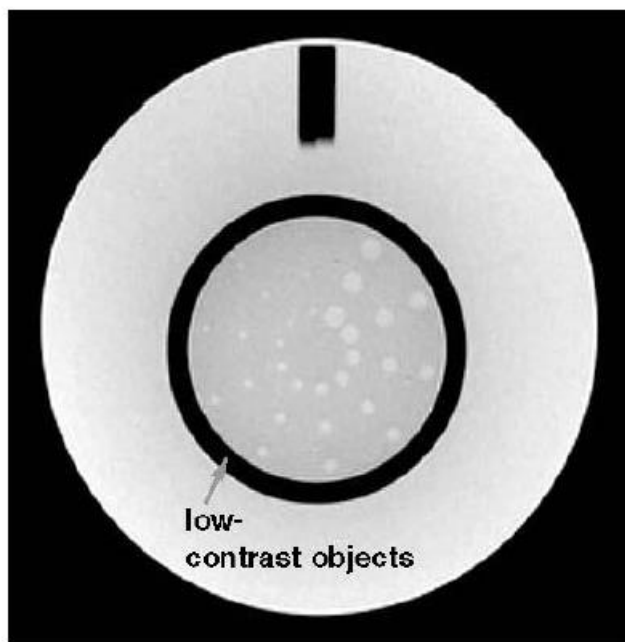
която отчита разликата между сигналите в посока на фазовото кодиране и тези в перпендикулярната посока, нормализирана спрямо централния сигнал. Получената стойност се изразява в проценти и характеризира относителната величина на ghosting артефактите.

Обикновено се приема, че тестът е успешно преминал, ако абсолютната стойност на PSG не надвишава 2.5%. По-високи стойности индикират наличие на значими ghosting артефакти, които могат да компрометират качеството на изображението [4], [5].

Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)

Нискоконтрастната пространствена разделителна способност (Low-Contrast Object Detectability, LCOD) представлява един от най-клинично значимите параметри в оценката на качеството на ЯМР изображенията, тъй като характеризира способността на системата да визуализира структури с малка разлика в сигналния интензитет спрямо околната среда. За разлика от висококонтрастната резолюция, която зависи предимно от геометричните параметри на изображението, нискоконтрастната разделителна способност, е силно зависима от съотношението сигнал/шум (SNR), контраст/шум (CNR), както и от хомогенността на сигнала. Този параметър има пряко клинично значение, тъй като много патологични изменения – като малки туморни лезии или възпалителни процеси, се проявяват именно като слабо контрастни структури.

Измерването се извършва върху срезове 8-11, където са разположени набор от дискове организирани в групи от по три цилиндрични отвори, разположени по кръгова конфигурация (Фигура 10). В рамките на всяка група контрастът е константен, докато диаметърът на отворите варира, което позволява оценка на детектируемостта в зависимост от пространствената резолюция. Оценката на нискоконтрастната откриваемост в ACR протокола се извършва чрез визуален анализ, при който се преброява броят на различимите обекти във всяка група [4], [5].



Фигура 10. Срез с дискове организирани в групи от по три цилиндрични отвори, разположени по кръгова конфигурация, използвани при оценка на нискоконтрастната пространствена разделителна способност.

Артефакти (Artifact)

Артефактите в магнитно-резонансните изображения представляват систематични или случайни отклонения в сигналната информация, които не отразяват реалната анатомична или физична структура на изследвания обект. Те възникват в резултат на несъвършенства в хардуера, нестабилност на магнитното или радиочестотното поле, ограничения на използваните секвенции или външни смущения. В контекста на контрола на качеството артефактите се разглеждат не само като нежелани визуални явления, но и като чувствителни индикатори за състоянието на ЯМР системата. Тяхното систематично идентифициране и анализ позволява ранно откриване на технически отклонения и предотвратяване на влошаване на диагностичното качество.

Една от основните групи артефакти са т.нар. ghosting артефакти, които се проявяват като периодични повторения на обекта по посока на фазовото кодиране. Те са резултат от нестабилност в градиентните полета, вариации в радиочестотния сигнал или външни електромагнитни смущения. В рамките на QA протокола тяхното наличие се оценява количествено чрез теста Percent Signal Ghosting Ratio, който измерва нивото на паразитен сигнал извън границите на фантома. Редовното прилагане на този тест позволява не само откриване, но и проследяване на тенденции, свързани с влошаване на системната стабилност, като по този начин допринася за превенцията на този тип артефакти.

Друг съществен клас са артефактите, свързани с нееднородност на основното магнитно поле (B_0 inhomogeneity), които водят до геометрични изкривявания и локални вариации в честотата на резонанс. Тези артефакти се проявяват чрез деформация на формата на обекта и неточности в измерените размери. Тестът за геометрична точност е основният инструмент за тяхното индиректно откриване, като отклоненията в линейните измервания могат да бъдат индикатор за наличие на подобни нарушения. Допълнително, тестовете за точност на позицията и дебелината на среза също могат да разкрият ефекти, свързани с нееднородности на магнитното поле.

Артефактите, произтичащи от нееднородност на радиочестотното поле, се проявяват като неравномерно разпределение на интензитета в изображението. Те са свързани с характеристиките на RF бобините и тяхното позициониране, както и с хомогенността на възбуждането. Тестът за равномерност на интензитета на изображението (image intensity uniformity) е директно насочен към оценка на този тип артефакти. Чрез анализ на интензитета в различни области на изображението се установяват вариации, които могат да бъдат индикатор за проблеми в RF системата.

Артефактите, свързани със съотношението сигнал/шум, се проявяват като зърнистост на изображението и намалена видимост на нискоконтрастни структури. Тяхното влияние се оценява чрез теста за нискоконтрастна пространствена разделителна способност (LCOD), при който се определя броят на различимите обекти с нисък контраст. Намаляването на броя детектирани структури е индикатор за влошено съотношение сигнал/шум и наличие на шумови артефакти. В този смисъл LCOD тестът изпълнява не само диагностична, но и превантивна функция, като позволява своевременно откриване на проблеми, свързани с чувствителността на системата.

Механично обусловените артефакти, включително такива, свързани с вибрации или нестабилност на пациентската маса, могат да доведат до размазване на изображението и неточности в позиционирането на срезовете. Тези ефекти се отразяват върху тестовете за точност на позицията и дебелината на среза, както и върху висококонтрастната разделителна способност. Провеждането

на механични QA тестове, включващи проверка на движението и стабилността на масата и закрепването на бобините, има ключова роля за предотвратяване на този тип артефакти.

Допълнително могат да се наблюдават артефакти, свързани с външни електромагнитни смущения, които се проявяват като случайни или периодични вариации в сигнала. Тяхното наличие може да бъде установено както чрез ghosting теста, така и чрез анализ на равномерността на сигнала. Контролът на RF екранировката и функционалността на вратата на помещението са част от мерките за предотвратяване на този тип нарушения.

Взаимовръзката между различните видове артефакти и QA тестове подчертава необходимостта от интегриран подход към оценката на качеството на изображението. Всеки тест предоставя информация за определен аспект от работата на системата, но едновременно им разглеждане позволява по-прецизна идентификация на източника на проблема. По този начин контролът на качеството изпълнява не само функция по оценка, но и активна роля в превенцията на артефакти, като осигурява поддържането на стабилни и оптимални условия за образна диагностика.

3. Резултати

3.1 Резултати от измерване проведено в ДКЦ Софиямед ЕООД

Таблица 4 показва резултатите от КК измерване проведено в ДКЦ „Софиямед“ ЕООД. При проведените тестове за безопасност не са установени отклонения от границите на нормална работа. Не са наблюдавани пукнатини по корпуса на ЯМР системата, нарушения в окабеляването или течове около скенера, в помещението с оборудването и в контролната зала. Всички системи, свързани с безопасната експлоатация на апарата, функционират нормално, включително паник бутонът, аварийните бутони, аудио-видео комуникационната система, вентилацията и светлинната индикация на вратата при активен магнит. Интерлок механизмът на вратата също функционира коректно. Всички проверени параметри при тестовите за безопасност са в рамките на границите на нормална работа (ГНР).

Механичните тестове показват нормална работа на пациентската маса и подвижните елементи на системата. Масата се движи плавно както в посока навътре/навън, така и нагоре/надолу, като не се наблюдават затруднения при движението или нестабилност. Закljučващият механизъм на масата функционира нормално, а вратата на помещението се затваря плътно и безпроблемно. Не са установени необичайни шумове в помещението на скенера. RF

бобините се закрепят стабилно и не се наблюдават механични дефекти или нестабилност по време на позициониране. Всички механични тестове са оценени като съответстващи на изискванията за нормална експлоатация.

Резултатите от тестовете за качество на образа показват добра стабилност и възпроизводимост на измерените параметри.

При теста за геометрична точност е измерена стойност 146.39 mm за сагитален локализиращ срез при референтна стойност $148 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. За аксиалните T1-претеглени изображения са измерени 190.47 mm в хоризонтална посока и 190.30 mm във вертикална посока, като и двете стойности попадат в допустимите граници.

При оценката на висококонтрастната пространствена разделителна способност са визуализирани структури с размер 1 mm както при T1-, така и при T2-претеглените серии, което отговаря на критериите на ACR протокола.

Измерената дебелина на среза е 5.13 mm за T1 серията и 5.04 mm за T2 серията при номинална дебелина $5.0 \pm 0.7 \text{ mm}$. Точността на позицията на среза е 0.89 mm при T1 серията и 0.25 mm при T2 серията, като и двете стойности са под допустимата граница.

Равномерността на интензитета на изображението е 96.68% при T1 серията и 96.60% при T2 серията, което е значително над минималната приемлива стойност от 80%.

Измереното Percent Signal Ghosting Ratio е 0.00035, като стойността е значително под границата от 0.03.

При теста за нискоконтрастна пространствена разделителна способност са визуализирани 37 обекта при T1 серията и 30 обекта при T2 серията, което съответства на критериите за приемливост.

Не са наблюдавани артефакти нито върху изображенията на ACR фантома, нито върху клиничните изображения. Всички измерени параметри са в рамките на границите на нормална работа.

Месечен контрол на качеството - ЯМР скенер	
Идентификация на клиента	ДКЦ "Софиямед" ЕООД
Адрес	бул. Г.М. Димитров 16, София
Обект на контрол	Magnetom Sola Fit, Siemens 1.5T
Място на обекта за контрол:	Бункер и контролно помещение към ЯМР скенер
Изготвил	Жанет Милушева
Консултант	мед. физ. Георги Георгиев
Използван фантом	ACR Large phantom

Дата на контрол		5/1/2026		
Метод и процедура на контрол: протокол за ЯМР контрол на качеството.				
Забележки		Няма		
Заключение	апарата е в изправност	апарата е в изправност, но има нужда от профилактика	апарата не е годен за клинична употреба	
	X			
Тестове за безопасност				
			ДА	НЕ
1	Пукнатини в корпуса на скенера:			X
2	Окабеляването на скенера е в изправност:		X	
3	Течове около скенера:			X
4	Течове в помещението с оборудването:			X
5	Течове в контролното помещение:			X
6	Паник бутон функционира:		X	
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират:		X	
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна:		X	
9	Аварийните бутони функционират:		X	
10	Вентилацията в помещението функционира:		X	
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи:		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Механични тестове				
			ДА	НЕ
12	Масата се движи плавно навътре/навън:		X	
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу:		X	
14	Масата се мести в посока навътре/навън:		X	
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу:		X	
16	Заклучването на масата работи нормално:		X	
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно:		X	
19	Гентрито се накланя и да се връща в неутрална позиция плавно:		X	
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера		X	
21	RF бобините се закрепят стабилно		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Тестове за качество на образа				
			ДА	НЕ
22	Геометрична точност (Geometric accuracy)			
	Sagittal Localizer срез, (ГНР: 148мм +3мм)		146.39	X

	Срез №6, T1 серия, Горизонтална посока (ГНР: 190мм +-3мм)		190.47	X	
	Срез №6, T1 серия, Вертикална посока (ГНР: 190мм +-3мм)		190.3	X	
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)				
	Срез №2, T1 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T1 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)				
	Срез №2, T1 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		5.13	X	
	Срез №2, T2 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		5.04	X	
25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)				
	Срез №1,11 T1 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	2.17	1.62	X	
	Срез №1,22, T2 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	2.33	2.8	X	
26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР: >=80%)		96.68	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР: >=80%)		96.60	X	
27	Percent Seignal Ghosting Ratio				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР <0.03)		0.0004	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР <0.03)		0.0003	X	
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)				
	(ГНР: серия T1, видими 3ки, >30)		37	X	
	(ГНР: серия T2, видими 3ки, >25)		30	X	
29	Артефакти (Artifact)				
	липса на артефакти на ACR фантом			X	
	липса на артефакти на клинични образи			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					

Таблица 4. Резултати от контрол на качеството на ЯМР скенер Siemens Magnetom Sola Fit, 1.5T в ДКЦ „Софиямед“ ЕООД – София.

3.2 Резултати от измерване №1 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Signa HDxt, GE 1.5T)

Таблица 5 показва резултатите от КК измерване проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД.

При проведените тестове за безопасност не са установени отклонения извън границите на нормална работа. Не са наблюдавани пукнатини по корпуса на ЯМР системата, нарушения в окабеляването или течове около скенера, в помещението с оборудването и в контролната зала. Потвърдена е нормалната работа на паник бутона, аварийните бутони, аудио-видео комуникационната система, вентилацията и светлинната индикация на вратата при активен магнит. Интерлок механизмът на вратата функционира коректно и не са установени проблеми, свързани с безопасната експлоатация на системата. Всички проверени параметри при тестовете за безопасност са в рамките на ГНР.

Механичните тестове показват нормална работа на подвижните компоненти на системата. Пациентската маса се движи плавно както в посока навътре/навън, така и нагоре/надолу, без наличие на нестабилност или затруднения при позициониране. Заклучващият механизъм на масата функционира нормално, а вратата на помещението се затваря плътно и безпроблемно. Не са установени необичайни шумове в помещението на скенера. RF бобините се закрепят стабилно и не се наблюдават механични дефекти по време на работа. Всички механични параметри са оценени като съответстващи на изискванията за нормална експлоатация.

Резултатите от тестовете за качество на образа показват стабилни и възпроизводими стойности за всички измерени параметри. При теста за геометрична точност е измерена стойност 146.21 mm за сагиталния локализиращ срез, при референтна стойност $148 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. За T1-претеглената серия са измерени 191.06 mm в хоризонтална посока и 188.51 mm във вертикална посока, като всички резултати попадат в допустимите граници.

При оценката на висококонтрастната пространствена разделителна способност са визуализирани структури с размер 1 mm както при T1-, така и при T2-претеглените серии, което съответства на критериите на ACR протокола.

Измерената дебелина на среза е 4.85 mm за T1 серията и 4.86 mm за T2 серията при номинална дебелина $5.0 \pm 0.7 \text{ mm}$.

Точността на позицията на среза показва стойности 2.43 mm и 1.26 mm за T1 серията, както и 1.76 mm и 0.98 mm за T2 серията, като всички измервания остават под допустимите граници. Равномерността на интензитета на изображението е 95.73% при T1 серията и 96.61% при T2 серията, което е значително над минималната приемлива стойност от 80%.

Измереното Percent Signal Ghosting Ratio е 0.0001, като стойността е значително под границата от 0.03.

При теста за нискоконтрастна пространствена разделителна способност са визуализирани 33 обекта при T1 серията и 33 обекта при T2 серията, което съответства на критериите за приемливост.

Не са наблюдавани артефакти нито върху изображенията на ACR фантома, нито върху клиничните изображения. Всички измерени параметри са в рамките на границите на нормална работа.

Месечен контрол на качеството - ЯМР скенер			
Идентификация на клиента	Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда		
Адрес	„Никола Й. Вапцаров“ 51Б, 1407 София		
Обект на контрол	Signa HDxt, GE 1.5T		
Място на обекта за контрол:	Бункер и контролно помещение към ЯМР скенер		
Изготвил	Жанет Милушева		
Консултант	мед. физ. Георги Георгиев		
Използван фантом	ACR Large phantom		
Дата на контрол	09.2025		
Метод и процедура на контрол: протокол за ЯМР контрол на качеството.			
Забележки			
Заклучение	апарата е в изправност	апарата е в изправност, но има нужда от профилактика	апарата не е годен за клинична употреба
	X		
Тестове за безопасност			
		ДА	НЕ
1	Пукнатини в корпуса на скенера:		X
2	Окабеляването на скенера е в изправност:	X	
3	Течове около скенера:		X
4	Течове в помещението с оборудването:		X
5	Течове в контролното помещение:		X
6	Паник бутон функционира:	X	
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират:	X	
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна:	X	

9	Аварийните бутони функционират:			X	
10	Вентилацията в помещението функционира:			X	
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи:			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					
Механични тестове					
				ДА	НЕ
12	Масата се движи плавно навътре/навън:			X	
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу:			X	
14	Масата се мести в посока навътре/навън:			X	
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу:			X	
16	Заклучването на масата работи нормално:			X	
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно:			X	
19	Гентрито се накланя и да се връща в неутрална позиция плавно:			X	
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера			X	
21	RF бобините се закрепят стабилно			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					
Тестове за качество на образа					
				ДА	НЕ
22	Геометрична точност (Geometric accuracy)				
	Sagittal Localizer срез, (ГНР: 148мм +3мм)		146.21	X	
	Срез №6, T1 серия, Хоризонтална посока (ГНР: 190мм +3мм)		191.06	X	
	Срез №6, T1 серия, Вертикална посока (ГНР: 190мм +3мм)		188.51	X	
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)				
	Срез №2, T1 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T1 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)				
	Срез №2, T1 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		4.85	X	
	Срез №2, T2 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		4.86	X	
25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)				
	Срез №1,11 T1 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	2.43	1.26	X	
	Срез №1,22, T2 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	1.76	0.98	X	

26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР: $\geq 80\%$)		95.73	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР: $\geq 80\%$)		96.61	X	
27	Percent Seignal Ghosting Ratio				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР < 0.03)		0.001	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР < 0.03)		0.001	X	
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)				
	(ГНР: серия T1, видими 3ки, > 30)		33	X	
	(ГНР: серия T2, видими 3ки, > 25)		33	X	
29	Артефакти (Artifact)				
	липса на артефакти на ACR фантом			X	
	липса на артефакти на клинични образи			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					

Таблица 5. Резултати от контрол на качеството на ЯМР скенер GE Signa HDxт в Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда – София.

3.3 Резултати от измерване №2 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Magnetom Skyra, Siemens 3T)

Таблица 6 показва резултатите от КК измерване проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД. При проведените тестове за безопасност не са установени отклонения извън границите на нормална работа. Не са наблюдавани пукнатини по корпуса на ЯМР системата, нарушения в окабеляването или течове около скенера, в помещението с оборудването и в контролната зала. Потвърдена е нормалната работа на паник бутона, аварийните бутони, аудио-видео комуникационната система и слушалките, вентилационната система и светлинната индикация на вратата при активен магнит. Интерлок механизмът на вратата също функционира коректно. За всички проверени показатели от групата на тестовите за безопасност е отчетено съответствие с ГНР, без регистрирани забележки.

Механичните тестове показват нормална работа на подвижните компоненти и спомагателните механизми на системата. Пациентската маса се движи плавно в посока навътре/навън и нагоре/надолу, като е потвърдена и функционалността на съответните механизми за преместване. Заклучването на масата работи нормално, а вратата се затваря плътно и безпроблемно. При проверката е отчетено плавно накланяне на гентрито и връщане в неутрална

позиция. Не са регистрирани необичайни шумове в помещението на скенера, а RF бобините се закрепят стабилно. Всички включени механични тестове са отчетени като съответстващи на ГНР, без допълнителни забележки.

При теста за геометрична точност е измерена стойност 146.78 mm за сагиталния локализиращ образ при зададени граници 148 ± 3 mm. За T1-претеглената серия са отчетени 190.00 mm в хоризонтална посока и 191.13 mm във вертикална посока. Всички измерени геометрични размери са отчетени като съответстващи на зададените граници на нормална работа.

При оценката на висококонтрастната пространствена разделителна способност е отчетена стойност 1 mm за всички включени измервания – UL и LR направленията както при T1-, така и при T2-претеглената серия. Получените резултати са в рамките на критерия ≤ 1 mm.

При теста за точност на дебелината на среза са измерени 5.53 mm за T1 серията и 4.79 mm за T2 серията при зададени граници 5.0 ± 0.7 mm.

При оценката на точността на позицията на среза са регистрирани стойности 3.45 mm и 2.70 mm за T1 серията, както и 3.60 mm и 2.58 mm за T2 серията. Всички отчетени стойности са в рамките на зададените критерии за приемливост.

Равномерността на интензитета на изображението е 96.90% при T1 серията и 98.78% при T2 серията, при минимално изискване $\geq 80\%$.

При теста за ghosting съотношение са получени стойности 0.0001 за T1 серията и 0.0002 за T2 серията, при зададена граница < 0.03 .

При оценката на нискоконтрастната пространствена разделителна способност са отчетени 39 видими обекта при T1 серията и 40 видими обекта при T2 серията.

При проверката за артефакти не са установени такива нито върху изображенията на ACR фантома, нито върху клиничните изображения. За всички проведени тестове за качество на образа е отчетено съответствие с границите на нормална работа, без допълнителни забележки.

Месечен контрол на качеството - ЯМР скенер

Идентификация на клиента	Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда
Адрес	„Никола Й. Вапцаров“ 51Б, 1407 София
Обект на контрол	Magnetom Skyra, Siemens 3T
Място на обекта за контрол:	Бункер и контролно помещение към ЯМР скенер
Изготвил	Жанет Милушева
Консултант	мед. физ. Георги Георгиев

Използван фантом		ACR Large phantom		
Дата на контрол		5/17/2026		
Метод и процедура на контрол: протокол за ЯМР контрол на качеството.				
Забележки		Няма		
Заключение	апарата е в изправност	апарата е в изправност, но има нужда от профилактика	апарата не е годен за клинична употреба	
	X			
Тестове за безопасност				
			ДА	НЕ
1	Пукнатини в корпуса на скенера:			X
2	Окабеляването на скенера е в изправност:		X	
3	Течове около скенера:			X
4	Течове в помещението с оборудването:			X
5	Течове в контролното помещение:			X
6	Паник бутон функционира:		X	
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират:		X	
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна:		X	
9	Аварийните бутони функционират:		X	
10	Вентилацията в помещението функционира:		X	
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи:		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Механични тестове				
			ДА	НЕ
12	Масата се движи плавно навътре/навън:		X	
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу:		X	
14	Масата се мести в посока навътре/навън:		X	
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу:		X	
16	Заклучването на масата работи нормално:		X	
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно:		X	
19	Гентрито се накланя и да се връща в неутрална позиция плавно:		X	
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера		X	
21	RF бобините се закрепят стабилно		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Тестове за качество на образа				
			ДА	НЕ
22	Геометрична точност (Geometric accuracy)			

	Sagittal Localizer срез, (ГНР: 148мм +-3мм)		146.78	X	
	Срез №6, T1 серия, Горизонтална посока (ГНР: 190мм +-3мм)		190	X	
	Срез №6, T1 серия, Вертикална посока (ГНР: 190мм +-3мм)		191.13	X	
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)				
	Срез №2, T1 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, UL (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T1 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
	Срез №2, T2 серия, LR (ГНР =<1мм)		1	X	
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)				
	Срез №2, T1 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		5.53	X	
	Срез №2, T2 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)		4.79	X	
25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)				
	Срез №1,11 T1 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	3.45	2.7	X	
	Срез №1,22, T2 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	3.6	2.58	X	
26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР: >=80%)		96.90	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР: >=80%)		98.78	X	
27	Percent Seignal Ghosting Ratio				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР <0.03)		0.0001	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР <0.03)		0.0002	X	
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)				
	(ГНР: серия T1, видими 3ки, >37)		39	X	
	(ГНР: серия T2, видими 3ки, >37)		40	X	
29	Артефакти (Artifact)				
	липса на артефакти на ACR фантом			X	
	липса на артефакти на клинични образи			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					

Таблица 6. Резултати от контрол на качеството на ЯМР скенер Siemens Magnetom Skyra, 3T в Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда – София.

3.4 Резултати от измерване №3 проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД (Magnetom Sola, Siemens 1.5T)

Таблица 7 показва резултатите от КК измерване проведено в УМБАЛ „Токуда“ ЕАД. При проведените тестове за безопасност не са установени отклонения извън границите на нормална работа. Не са наблюдавани пукнатини по корпуса на ЯМР системата, нарушения в окабеляването или течове около скенера, в помещението с оборудването и в контролното помещение. Потвърдена е нормалната работа на паник бутона, аудио-видео комуникационната система и слушалките, светлинната индикация на вратата при активен магнит, аварийните бутони и вентилационната система. Интерлок механизмът на вратата също функционира нормално. За всички включени показатели от групата на тестовите за безопасност е отчетено съответствие с ГНР, без допълнителни забележки.

Механичните тестове показват нормална работа на подвижните компоненти и спомагателните механизми на системата. Пациентската маса се движи плавно в посока навътре/навън и нагоре/надолу, като са потвърдени и нормалното преместване и позициониране в съответните направления. Заклучващият механизъм на масата функционира нормално, а вратата се затваря плътно и безпроблемно. При проверката е отчетено плавно накланяне на гентритото и връщане в неутрална позиция. Не са регистрирани необичайни шумове в помещението на скенера, а RF бобините се закрепят стабилно. Всички проведени механични тестове са отчетени като съответстващи на ГНР.

При теста за геометрична точност е измерена стойност 147.51 mm за сагиталния локализиращ образ при зададени граници 148 ± 3 mm. За T1-претеглената серия са отчетени 190.42 mm в хоризонтална посока и 190.30 mm във вертикална посока. Всички измерени геометрични размери са в рамките на зададените граници на нормална работа.

При оценката на висококонтрастната пространствена разделителна способност е отчетена стойност 1 mm за UL и LR направленията както при T1-, така и при T2-претеглената серия, при критерий ≤ 1 mm. При теста за точност на дебелината на среза са измерени 4.67 mm за T1 серията и 4.40 mm за T2 серията при зададени граници 5.0 ± 0.7 mm. И двете стойности са отчетени като съответстващи на критериите за качество.

При оценката на точността на позицията на среза са регистрирани стойности 4.82 mm и 3.34 mm за T1 серията, както и 4.80 mm и 3.50 mm за T2 серията. Получените резултати са в рамките на зададените критерии за приемливост. Равномерността на интензитета на изображението е 89.65% при T1 серията и 89.45% при T2 серията, при минимално изискване

≥80%. При теста за процентно ghosting съотношение са измерени стойности 0.0037 за T1 серията и 0.0030 за T2 серията, при зададена граница <0.03.

При първоначалното провеждане на контрола на качеството единствено тест №28 – нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability) – не изпълнява зададените критерии за качество. При T1-претеглената серия са визуализирани 18 нискоконтрастни обекта при критерий >30, а при T2-претеглената серия – 15 обекта при критерий >25. Поради това тест №28 е отчетен като несъответстващ на установените граници. Останалите проведени тестове за качество на образа отговарят на приложените критерии. При проверката за артефакти не са установени такива нито върху изображенията на ACR фантома, нито върху оценените клинични изображения.

След първоначалното измерване са извършени технически и профилактични дейности от инженери на Siemens, последвани от повторно провеждане на контрола на качеството. При повторния QA контрол всички тестове, включително тест №28, изпълняват зададените критерии за качество, поради което крайната оценка на системата е за изправен апарат. Важно е да се отбележи, че към момента както на първоначалния, така и на повторния QA контрол ЯМР системата все още е била в процес на инсталация и въвеждане в експлоатация. Поради това установеното първоначално несъответствие при тест №28 не е засегнало пациенти и не е оказало влияние върху клинични изследвания, тъй като системата не е била използвана за рутинна клинична дейност през този период.

Месечен контрол на качеството - ЯМР скенер

Идентификация на клиента	Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда
Адрес	„Никола Й. Вапцаров“ 51Б, 1407 София
Обект на контрол	Magnetom Sola, Siemens 1.5T
Място на обекта за контрол:	Бункер и контролно помещение към ЯМР скенер
Изготвил	Жанет Милушева
Консултант	мед. физ. Георги Георгиев
Използван фантом	ACR Large phantom
Дата на контрол	5/17/2026
Метод и процедура на контрол: протокол за ЯМР контрол на качеството.	
Забележки	Тест №28 не отговаря на критериите за качество. Съобщено е на отговорните лица, за насочване на технически контрол.

Заклучение	апарата е в изправност	апарата е в изправност, но има нужда от профилактика	апарата не е годен за клинична употреба	
		X		
Тестове за безопасност				
			ДА	НЕ
1	Пукнатини в корпуса на скенера:			X
2	Окабеляването на скенера е в изправност:		X	
3	Течове около скенера:			X
4	Течове в помещението с оборудването:			X
5	Течове в контролното помещение:			X
6	Паник бутон функционира:		X	
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират:		X	
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна:		X	
9	Аварийните бутони функционират:		X	
10	Вентилацията в помещението функционира:		X	
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи:		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Механични тестове				
			ДА	НЕ
12	Масата се движи плавно навътре/навън:		X	
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу:		X	
14	Масата се мести в посока навътре/навън:		X	
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу:		X	
16	Заклучването на масата работи нормално:		X	
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно:		X	
19	Гентрито се накланя и да се връща в неутрална позиция плавно:		X	
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера		X	
21	RF бобините се закрепят стабилно		X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР				
Тестове за качество на образа				
			ДА	НЕ
22	Геометрична точност (Geometric accuracy)			
	Sagittal Localizer срез, (ГНР: 148мм +-3мм)		147.51	X
	Срез №6, T1 серия, Хоризонтална посока (ГНР: 190мм +-3мм)		190.42	X

	Срез №6, T1 серия, Вертикална посока (ГНР: 190мм +-3мм)			190.3	X	
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)					
	Срез №2, T1 серия, UL (ГНР =<1мм)			1	X	
	Срез №2, T2 серия, UL (ГНР =<1мм)			1	X	
	Срез №2, T1 серия, LR (ГНР =<1мм)			1	X	
	Срез №2, T2 серия, LR (ГНР =<1мм)			1	X	
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)					
	Срез №2, T1 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)			4.67	X	
	Срез №2, T2 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)			4.40	X	
25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)					
	Срез №1,11 T1 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)		4.82	3.34	X	
	Срез №1,22, T2 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)		4.8	3.5	X	
26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)					
	Срез №7 T1 серия, (ГНР: >=80%)			89.65	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР: >=80%)			89.45	X	
27	Percent Seignal Ghosting Ratio					
	Срез №7 T1 серия, (ГНР <0.03)			0.004	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР <0.03)			0.003	X	
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)					
	(ГНР: серия T1, видими 3ки, >30)			18		X
	(ГНР: серия T2, видими 3ки, >25)			15		X
29	Артефакти (Artifact)					
	липса на артефакти на ACR фантом				X	
	липса на артефакти на клинични образи				X	
Забележки: тест №28 не отговаря на критериите за качество.						

Таблица 7. Резултати от контрол на качеството на ЯМР скенер Magnetom Sola, Siemens 1.5T в Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда – София.

3.5 Резултати от измерване проведено в Университетска Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител”

Таблица 8 показва резултатите от КК измерване проведено в Университетска Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител”. При проведените тестове за безопасност не са установени отклонения извън границите на нормална работа. Не са наблюдавани пукнатини по корпуса на ЯМР системата, нарушения в окабеляването или течове около скенера, в помещението с оборудването и в контролното помещение. Потвърдена е нормалната работа на паник бутона, аудио-видео комуникационната система и слушалките, светлинната индикация на вратата при активен магнит, аварийните бутони и вентилационната система. Интерлок механизмът на вратата също функционира нормално. За всички включени показатели от групата на тестовете за безопасност е отчетено съответствие с ГНР, без допълнителни забележки.

Механичните тестове показват нормална работа на подвижните компоненти и спомагателните механизми на системата. Пациентската маса се движи плавно в посока навътре/навън и нагоре/надолу, като са потвърдени нормалното ѝ преместване и позициониране в съответните направления. Заклучващият механизъм на масата функционира нормално, а вратата се затваря плътно и безпроблемно. При проверката е отчетено нормално движение на гентритото и връщане в неутрална позиция. Не са регистрирани необичайни шумове в помещението на скенера, а RF бобините се закрепят стабилно. Всички проведени механични тестове са отчетени като съответстващи на ГНР.

При теста за геометрична точност е измерена стойност 145.01 mm за сагиталния локализиращ образ при зададени граници 148 ± 3 mm. За T1-претеглената серия са отчетени 192.90 mm в хоризонтална посока и 192.70 mm във вертикална посока при зададени граници 190 ± 3 mm. Резултатите от проведените измервания са отчетени като съответстващи на приложените критерии.

При оценката на висококонтрастната пространствена разделителна способност е отчетена стойност 1 mm за UL и LR направленията както при T1-, така и при T2-претеглената серия, при критерий ≤ 1 mm. При теста за точност на дебелината на среза са измерени 5.62 mm за T1 серията и 5.04 mm за T2 серията при зададени граници 5.0 ± 0.7 mm.

При оценката на точността на позицията на среза са регистрирани стойности 3.55 mm и 1.90 mm за T1 серията, както и 3.20 mm и 1.88 mm за T2 серията.

Всички отчетени резултати за висококонтрастна пространствена разделителна способност, дебелина и позиция на среза са в рамките на съответните критерии за приемливост.

Равномерността на интензитета на изображението е 96.88% при T1 серията и 95.63% при T2 серията, при минимално изискване $\geq 80\%$.

При теста за процентно ghosting съотношение са измерени стойности 0.0003 за T1 серията и 0.0002 за T2 серията, при зададена граница < 0.03 .

При оценката на нискоконтрастната пространствена разделителна способност са визуализирани 35 обекта при T1 серията и 33 обекта при T2 серията, като резултатите отговарят на зададените критерии съответно > 30 и > 25 видими обекта.

При първоначалното провеждане на контрола на качеството тест №29 – оценка за наличие на артефакти – не изпълнява критерия за приемливост. В изображенията на ACR фантома е регистриран артефакт от тип геометрично изкривяване (geometric distortion), поради което резултатът от тест №29 е отчетен като несъответстващ. Същевременно при оценката на клиничните изображения не са регистрирани артефакти.

Месечен контрол на качеството - ЯМР скенер			
Идентификация на клиента	Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител”		
Адрес	бул. „Патриарх Евтимий“ №37, гр. София		
Обект на контрол	Magnetom Essenza, Siemens 1.5T		
Място на обекта за контрол:	Бункер и контролно помещение към ЯМР скенер		
Изготвил	Жанет Милушева		
Консултант	мед. физ. Георги Георгиев		
Използван фантом	ACR Large phantom		
Дата на контрол	6/8/2026		
Метод и процедура на контрол: протокол за ЯМР контрол на качеството.			
Забележки	Несъответствието е съобщено на отговорните лица за предприемане на корективни мерки.		
Заключение	апарата е в изправност	апарата е в изправност, но има нужда от профилактика	апарата не е годен за клинична употреба
		X	
Тестове за безопасност			
		ДА	НЕ
1	Пукнатини в корпуса на скенера:		X
2	Окабеляването на скенера е в изправност:	X	
3	Течове около скенера:		X

4	Течове в помещението с оборудването:				X
5	Течове в контролното помещение:				X
6	Паник бутон функционира:			X	
7	Аудио-видео системата и слушалките функционират:			X	
8	Светлинната индикация на вратата (при включен магнит) е активна:			X	
9	Аварийните бутони функционират:			X	
10	Вентилацията в помещението функционира:			X	
11	Интерлок механизмът на вратата (при включен магнит) работи:			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					
Механични тестове					
				ДА	НЕ
12	Масата се движи плавно навътре/навън:			X	
13	Масата се движи плавно нагоре/надолу:			X	
14	Масата се мести в посока навътре/навън:			X	
15	Масата се мести в посока нагоре/надолу:			X	
16	Заклучването на масата работи нормално:			X	
17	Вратата се затваря плътно и работи безпроблемно:			X	
19	Гентритото се накланя и да се връща в неутрална позиция плавно:			X	
20	Не се чуват необичайни шумове с помещението на скенера			X	
21	RF бобините се закрепят стабилно			X	
Забележки: Няма, всички параметри са в ГНР					
Тестове за качество на образа					
				ДА	НЕ
22	Геометрична точност (Geometric accuracy)				
	Sagittal Localizer срез, (ГНР: 148мм +3мм)		145.01	X	
	Срез №6, T1 серия, Хоризонтална посока (ГНР: 190мм +3мм)		192.9	X	
	Срез №6, T1 серия, Вертикална посока (ГНР: 190мм +3мм)		192.7	X	
23	Висококонтрастна пространствена разделителна способност (High-contrast spatial resolution)				
	Срез №2, T1 серия, UL (ГНР =<1мм)	1		X	
	Срез №2, T2 серия, UL (ГНР =<1мм)	1		X	
	Срез №2, T1 серия, LR (ГНР =<1мм)	1		X	
	Срез №2, T2 серия, LR (ГНР =<1мм)	1		X	
24	Точност на дебелината на среза (Slice thickness accuracy)				
	Срез №2, T1 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)	5.62		X	
	Срез №2, T2 серия, (ГНР 5.0 ±0.7мм)	5.04		X	

25	Точност на позицията на среза (Slice position accuracy)				
	Срез №1,11 T1 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	3.55	1.9	X	
	Срез №1,22, T2 серия, (ГНР: разлика <5мм, ГБР <7мм)	3.2	1.88	X	
26	Равномерност на интензитета на изображението (Image intensity uniformity)				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР: >=80%)		96.88	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР: >=80%)		95.63	X	
27	Percent Seignal Ghosting Ratio				
	Срез №7 T1 серия, (ГНР <0.03)		0.0003	X	
	Срез №7 T2 серия, (ГНР <0.03)		0.0002	X	
28	Нискоконтрастна пространствена разделителна способност (Low-contrast object detectability)				
	(ГНР: серия T1, видими 3ки, >30)		35	X	
	(ГНР: серия T2, видими 3ки, >25)		33	X	
29	Артефакти (Artifact)				
	липса на артефакти на ACR фантом				X
	липса на артефакти на клинични образи			X	
Забележки: забелязва се Geometric distortion артефакт					

Таблица 8. Резултати от контрол на качеството на ЯМР скенер Siemens Magnetom Essenza, 1.5T в
Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител”.

4. Дискусия

Настоящото изследване имаше за основна цел разработването и пилотното прилагане на структуриран протокол за контрол на качеството при ЯМР системи, адаптиран към практическите условия в България. Разработеният подход обединява три взаимно допълващи се направления – тестове за безопасност, механични тестове и тестове за качество на образа с ACR ЯМР фантом[4], [5]. Протоколът е приложен върху пет ЯМР системи четири от които с магнитно поле 1.5 T и една с 3 T, разположени в три лечебни заведения в гр. София. Включването на системи с различни технически характеристики и от различни производители позволява да се направи първоначална оценка както на приложимостта на разработената методика, така и на способността ѝ да открива реални технически отклонения. Получените резултати показват, че протоколът може да бъде успешно приложен в клинична среда и, което е особено важно, че не функционира единствено

като формална контролна процедура, а е способен да идентифицира конкретни несъответствия, изискващи техническа намеса.

Общата оценка на резултатите показва високо ниво на съответствие с предварително зададените критерии за приемливост [4], [5]. При всички изследвани системи тестовете за безопасност и механична функционалност са преминали успешно. При тестовете за качество на образа по-голямата част от измерените показатели също попадат в определените граници на нормална работа.

Получените резултати следва да бъдат разглеждани и в контекста на международно утвърдените подходи за контрол на качеството при ЯМР. Наблюдаваното съответствие на геометричната точност, висококонтрастната пространствена разделителна способност, дебелината и позицията на среза, равномерността на интензитета и ghosting показателя с предварително зададените граници е в съответствие с принципите на ACR за фантом-базирана оценка на техническото състояние на ЯМР системите [4], [5]. Същевременно използването на количествени и възпроизводими показатели съответства на по-широката международна рамка, заложена в IEC 62464-1 и програмата на IAEA за осигуряване на качеството при ЯМР [7], [9].

Две първоначални несъответствия имат особено значение за интерпретацията на резултатите. При Siemens Magnetom Sola 1.5 T в Аджибадем Сити Клиник УМБАЛ Токуда, първоначално не е преминал тест №28 за нискоконтрастна детектируемост, докато при Siemens Magnetom Essenza 1.5 T в Първа МБАЛ София „Св. Йоан Кръстител“ първоначално не е преминал тест №29 поради наличие на геометричен артефакт. И в двата случая са уведомени отговорните лица за предприемане на сервизна дейност. Тези два случая представляват едни от най-съществените резултати на настоящата работа, тъй като демонстрират практическата чувствителност на разработения QA протокол към различни категории отклонения в качеството на образа.

Получените резултати са съпоставими с публикувани международни проучвания, в които ACR MRI фантомът е използван като основен инструмент за контрол на качеството на клинични ЯМР системи. Chen и сътр. прилагат ACR фантомния протокол върху четири клинични ЯМР скенера и описват същите основни показатели: геометрична точност, висококонтрастна пространствена разделителна способност, дебелина и позиция на среза, равномерност на интензитета, percent signal ghosting и нискоконтрастна детектируемост [15]. Подобно на техния подход, настоящото изследване показва, че ACR фантомът е приложим не само за формална оценка на качеството, но и за подпомагане на сервизната диагностика при установяване на отклонения.

Особено съществено е, че установените отклонения не се ограничават до формално несъответствие с предварително зададени критерии, а демонстрират практическата чувствителност на периодичния QA контрол към промени в техническото състояние на системата. Този резултат е в съответствие с международно приетата концепция, че фантом-базираните QA програми трябва да се използват не само за приемателно изпитване, но и за проследяване на стабилността на системата във времето и за ранно идентифициране на отклонения, които могат да повлияят върху качеството на образа [9]–[11].

4.1. Обща оценка на приложимостта на разработения протокол

Един от основните практически резултати от изследването е демонстрираната възможност един унифициран протокол да бъде приложен при различни ЯМР системи. В проучването са включени Siemens Magnetom Sola Fit 1.5 T, GE Signa HDxt 1.5 T, Siemens Magnetom Skyra 3 T, Siemens Magnetom Sola 1.5 T и Siemens Magnetom Essenza 1.5 T. Това е важно, тъй като ЯМР системите се различават по конструкция, поколение, магнитно поле, RF архитектура, градиентни характеристики, реконструкционните алгоритми и софтуерни решения. Независимо от тези различия основните параметри на качеството на образа могат да бъдат оценени чрез стандартизирани тестови структури и предварително определени критерии.

Резултатите показват, че използването на ACR фантом осигурява обща измервателна рамка за оценка на различни системи. В същото време проучването демонстрира, че интерпретацията не трябва да се свежда единствено до бинарна оценка „преминал/не преминал“. Съществени са както абсолютните стойности, така и близостта им до граничните критерии, съгласуваността между T1- и T2-претеглените серии и едновременното поведение на различни QA показатели. Например две системи могат да преминат един и същ тест, но едната да показва значително по-голям резерв спрямо критерия за приемливост. Това не означава автоматично наличие на технически проблем при системата с по-малък резерв, но има значение при бъдещо проследяване във времето.

В този контекст разработеният протокол може да се разглежда като подходяща основа за периодичен контрол, но най-голямата му стойност би се проявила при серийно приложение. Еднократното измерване показва състоянието на системата в конкретен момент, докато периодичните измервания биха позволили установяване на тенденции. Постепенно понижаване на RPU, увеличение на ghosting показателя, систематично отклонение на дебелината на среза или намаляване на броя видими нискоконтрастни обекти могат да бъдат значими още преди достигане на формалната граница за неприемлив резултат. Следователно бъдещото развитие на протокола

следва да включва не само критерии за приемливост, но и локални базови стойности за всяка конкретна система.

4.2. Анализ на тестовете за безопасност и механична функционалност

При всички пет изследвани ЯМР системи тестовете за безопасност са преминати успешно. Не са установени пукнатини по корпусите, нарушения в окабеляването или течове около скенерите, в техническите помещения и контролните зали. Потвърдена е функционалността на паник бутоните, аварийните системи, аудио-видео комуникацията, вентилацията, светлинната индикация и интерлок механизмите на вратите. Този резултат показва, че към момента на проверките основните контролирани елементи са били в състояние, съответстващо на зададените изисквания.

Липсата на несъответствия при тази група тестове не намалява значението им. Напротив, включването им разширява концепцията за контрол на качеството отвъд чисто образните характеристики. При ЯМР силното статично магнитно поле е постоянно наличен фактор, поради което безопасността зависи не само от качеството на получените изображения, но и от функционирането на комуникационните, аварийните, вентилационните и контролните системи. Една система може да показва отлични фантомни резултати и едновременно с това да има проблем с комуникацията с пациента, паник системата или контрола на достъпа. Подобен проблем няма задължително да бъде открит чрез стандартен анализ на ACR изображения. Поради тази причина интегрирането на тестовете за безопасност в общия протокол представлява важна характеристика на разработения подход.

Механичните тестове също са преминати успешно при всички системи. Не са установени проблеми с движението на пациентската маса, нейното заключване, затварянето на вратите, наличието на необичайни шумове или стабилността на закрепване на RF бобините. Тези резултати са положителни, но трябва да се интерпретират в контекста на характера на използваната методика. Значителна част от механичните проверки са функционални и наблюдателни. Те позволяват откриване на явни проблеми, но не представляват непременно количествена оценка на точността и възпроизводимостта на механичното позициониране.

Това очертава възможност за бъдещо усъвършенстване на протокола. Например движението на масата може да бъде допълнено с количествена проверка на точността на зададено спрямо реално преместване. Подобен подход би позволил откриване на по-малки систематични отклонения, които не се установяват чрез визуална оценка на плавността на движение. Независимо от това, в настоящото пилотно изследване избраните механични тестове изпълняват основната си цел – да

осигурят стандартизирана проверка на функционалното състояние на ключови механични компоненти.

4.3. Геометрична точност и възпроизводимост на пространственото представяне

Резултатите от теста за геометрична точност като цяло показват добро възпроизвеждане на известните размери на фантома. При Siemens Magnetom Sola Fit 1.5 T, ширината на фантома в сагитален срез е 146.39 mm, а аксиалните размери са 190.47 mm и 190.30 mm. При GE Signa HDxt 1.5 T съответните стойности са 146.21 mm, 191.06 mm и 188.51 mm. При Siemens Magnetom Skyra 3 T са измерени 146.78 mm, 190.00 mm и 191.13 mm, а при Siemens Magnetom Sola 1.5 T – 147.51 mm, 190.42 mm и 190.30 mm. При Siemens Magnetom Essenza 1.5 T стойностите са 145.01 mm, 192.90 mm и 192.70 mm.

Сравнението между системите показва, че Magnetom Sola 1.5 T демонстрира много малки отклонения от номиналните размери, особено при аксиалните измервания. Magnetom Skyra 3 T също показва висока геометрична точност. При Magnetom Essenza стойностите се разполагат непосредствено до използваните граници на приемливост: 145.01 mm спрямо долна граница 145 mm за сагиталното измерване и 192.90/192.70 mm спрямо горна граница 193 mm за аксиалните измервания. Формално тези резултати са приемливи, но близостта им до границите има важно значение. В комбинация с първоначално наблюдавания геометричен артефакт това подкрепя необходимостта от по-внимателно проследяване на системата.

Тук трябва да се подчертае, че приемлив резултат при ограничен брой линейни измервания не изключва наличие на локализирано геометрично изкривяване. Тестът за геометрична точност характеризира конкретни размери в конкретни направления и срезове. Артефактът може да има пространствено нееднороден характер и да бъде по-изразен в друга област на изображението. Именно това вероятно обяснява привидното различие между формално преминатия количествен тест №22 и първоначално непреминатия визуален тест №29 при Magnetom Essenza. Следователно тези два резултата не трябва да се разглеждат като взаимно противоречиви. Напротив, те показват защо количествената геометрична оценка трябва да бъде комбинирана с визуална проверка на целия фантомен образ.

Възможните технически причини за геометрични изкривявания включват нелинейност на градиентните полета, отклонения в градиентната калибровка, нехомогенност на B_0 , недостатъчна корекция на геометричните деформации или взаимодействие между конкретните настройки на системата и реконструкционния алгоритъм. От наличните резултати не може еднозначно да се

определи точният първопричинен механизъм, тъй като това би изисквало сервизни диагностични данни и подробна информация за извършената техническа намеса.

4.4. Висококонтрастна пространствена разделителна способност

Всички изследвани системи преминават теста за висококонтрастна пространствена разделителна способност. При повечето 1.5 T системи са разграничени структури с размер 1 mm в оценяваните направления при T1- и T2-претеглените серии. При 3 T Magnetom Skyra са отчетени 1mm за всички включени оценки, като тук отделните отвори се бизуализираха най-добре и поради това може да се каже, представлява най-добрия резултат в изследваната група.

По-добрият резултат при 3 T системата е възможен, тъй като по-високото магнитно поле по принцип предоставя потенциал за по-високо SNR, което може да бъде използвано за подобряване на пространствената резолюция. Тази интерпретация обаче трябва да бъде предпазлива. Пространствената разделителна способност не се определя само от силата на магнитното поле, а и от матрицата, FOV, дебелината на среза, градиентната система, RF бобината, реконструкцията и конкретния протокол. Освен това в настоящото изследване има само една 3 T система, поради което не може да се направи общ статистически извод, че 3 T системите систематично превъзхождат 1.5 T системите.

Подобна предпазливост е необходима и при сравнение с международни резултати. Ihalainen и сътр. показват, че при използване на ACR фантом в многоапаратен център преминаването на отделните тестове зависи не само от магнитното поле, но и от използваната серия, локалния протокол и конкретната конфигурация на апарата. В тяхното проучване ACR сериите показват висока успеваемост за геометрична точност, slice position accuracy, ghosting и нискоконтрастна детектируемост, докато site-specific сериите имат по-ниска успеваемост за част от показателите [16]. Това подкрепя избора в настоящата работа да се използват стандартизирани ACR серии като основа за сравнение между различни ЯМР системи.

Резултатите все пак показват, че разработеният протокол е приложим при различни стойности на магнитното поле. От практическа гледна точка липсата на неуспешни резултати при този тест означава, че установените проблеми при тестове №28 и №29 не са били резултат от общо тежко влошаване на пространствената резолюция. Това е особено важно при Magnetom Sola 1.5 T, където висококонтрастната резолюция е 1 mm и преминава критерия, докато нискоконтрастната детектируемост първоначално е силно понижена. Разликата показва, че една система може да визуализира добре малки висококонтрастни структури и едновременно с това да има затруднение при разграничаване на нискоконтрастни обекти. Следователно двата теста оценяват различни и взаимно незаменими аспекти на качеството.

4.5. Точност на дебелината на среза

Всички системи преминават критерия за точност на дебелината на среза, но между тях се наблюдават различия. При Magnetom Sola Fit са измерени 5.13 mm за T1 и 5.04 mm за T2, което е много близко до номиналните 5 mm. GE Signa HDxt показва 4.85 mm и 4.86 mm, също с висока съгласуваност между двете серии. При Magnetom Skyra резултатите са 5.53 mm и 4.79 mm, при Magnetom Sola – 4.67 mm и 4.40 mm, а при Magnetom Essenza – 5.62 mm и 5.04 mm.

Особен интерес представлява съгласуваността между T1 и T2 резултатите. При Sola Fit разликата е едва 0.09 mm, а при GE Signa HDxt – 0.01 mm. Това предполага висока възпроизводимост на пространствената селекция на среза между двете серии. При Skyra разликата е по-голяма – 0.74 mm, като T1 стойността е над номиналната, а T2 е под нея. При Sola разликата е 0.27 mm, а при Essenza – 0.58 mm. Всички отделни резултати остават в използваните граници, но по-голямата разлика между серии заслужава внимание при последващи периодични измервания.

Възможните причини за подобни различия включват особености в RF профила за селекция на среза, различия между използваните импулсни последователности, чувствителност към начина на определяне на границите на рамките, partial-volume ефекти и операторска неопределеност при ръчно измерване. Поради това единична разлика между T1 и T2 не следва автоматично да се приема като техническа неизправност. Ако обаче при серийни измервания се наблюдава стабилно нарастващо отклонение или систематично приближаване към границата, това би представлявало основание за допълнителна проверка.

При Magnetom Sola T2 стойността от 4.40 mm се намира сравнително близо до долната граница 4.3 mm, а при Magnetom Essenza T1 стойността от 5.62 mm е близо до горната граница 5.7 mm. Тези резултати са преминали теста, но илюстрират ограничението на чисто бинарната оценка. При бъдеща програма за периодичен QA би било полезно тези стойности да се проследяват като времеви серии.

4.6. Точност на позицията на среза

Всички системи преминават теста за точност на позицията на среза. Наблюдават се обаче различия в големината на отчетените стойности. При Sola Fit резултатите са относително ниски, а при GE Signa HDxt също се наблюдават стойности с достатъчен резерв спрямо критерия. При Skyra стойностите достигат 3.60 mm, докато при Sola са отчетени до 4.82 mm и 4.80 mm –

непосредствено под използваната граница от 5 mm. Този резултат при Magnetom Sola заслужава специално внимание, въпреки че формално тестът е преминал. Стойности 4.82 mm и 4.80 mm са много близки до критерия и следователно имат малък резерв. Възможните причини включват леко неточно позициониране или наклон на фантома, отклонение при планиране на срезове от локализатора, особености в градиентната калибровка или комбинация от тези фактори. Тъй като системата по време на първоначалния контрол все още е била в процес на инсталация и въвеждане в експлоатация, вероятността резултатите да са повлияни от незавършена оптимизация и калибровка трябва да бъде разглеждана като вероятна.

Важен методологичен аспект е, че тестът за позиция на среза е чувствителен и към операторски фактор. Дори при технически изправна система неправилното центриране на фантома, неговият наклон или неточното планиране на аксиалните срезове могат да доведат до по-неблагоприятен резултат. Следователно при стойност близо до границата е подходящо първо да се провери позиционирането и при необходимост измерването да се повтори, преди да се заключи наличие на хардуерен проблем.

4.7. Равномерност на интензитета на изображението

Резултатите за равномерност на интензитета показват ясно изразени различия между системите. Magnetom Sola Fit достига 96.68% за T1 и 96.60% за T2; GE Signa HDxt – 95.73% и 96.61%; Magnetom Skyra – 96.90% и 98.78%; Magnetom Sola – 89.65% и 89.45%; Magnetom Essenza – 96.88% и 95.63%. Всички стойности преминават използвания в изследването критерий $\geq 80\%$, но Sola показва отчетливо по-ниска равномерност от останалите системи.

Това наблюдение е особено важно в контекста на първоначалния неуспех на същата система при нискоконтрастната детектируемост. PIU около 89.5% е приемлив според приложените критерии, но е с приблизително 6–9 процентни пункта по-нисък от резултатите на останалите системи. Сам по себе си този факт не доказва техническа неизправност. В комбинация с много ниския първоначален LCOD резултат обаче той подсказва, че качеството на сигнала при тази система към момента на първия QA контрол е било по-неблагоприятно.

Възможните причини за по-ниска равномерност включват особености или непълна оптимизация на RF предавателната и приемната система, позициониране на фантома спрямо чувствителността на бобината, настройки на intensity correction алгоритмите, както и незавършени калибрационни процедури. Тъй като апаратът е бил в процес на инсталация, последното обстоятелство е особено релевантно. Не е възможно въз основа само на настоящите данни да се определи коя от тези причини е била водеща.

Най-високата отчетена PIU стойност е 98.78% за T2 серията на 3 T Magnetom Skyra. Този резултат демонстрира много висока равномерност в условията на използвания протокол. Не трябва обаче автоматично да се заключава, че по-високото магнитно поле винаги води до по-добра равномерност. При 3 T, B_1 нехомогенността може да бъде по-изразена, а крайният резултат зависи от архитектурата на системата, RF технологията, бобината, позиционирането и корекционните алгоритми.

4.8. Percent Signal Ghosting Ratio

Всички системи показват стойности на Percent Signal Ghosting Ratio значително под зададената граница от 0.03. При Sola Fit са отчетени приблизително 0.0004 и 0.0003, при GE Signa HDxt – около 0.001, при Skyra – 0.0001 и 0.0002, при Sola – около 0.004 и 0.003, а при Essenza – 0.0003 и 0.0002.

И при този показател Magnetom Sola демонстрира най-високи стойности в изследваната група, макар те да остават многократно под критерия за отхвърляне. Това отново е интересно при съвместна интерпретация с по-ниската равномерност и неуспешния първоначален LCOD тест. Не следва да се твърди, че тези резултати доказват обща единна причина, но тяхното съвпадение в една система е аргумент в полза на интегрираното разглеждане на QA показателите.

По-висок ghosting показател може да бъде свързан с нестабилност в системата, фазови несъответствия, RF смущения, градиентни ефекти или механични фактори. При фантомно изследване физиологичното движение, което е основен източник на ghosting при пациенти, практически отсъства. Поради това фантомният тест е особено полезен за разграничаване на системно обусловени ефекти. В конкретния случай обаче стойностите остават приемливи и не позволяват да се говори за самостоятелен неуспех на ghosting теста.

4.9. Нискоконтрастна детектируемост и анализ на неуспешен тест от КК при Magnetom Sola

Тест №28 е един от най-информативните резултати в настоящото изследване. При повторният КК на Sola Fit този тест преминава успешно. При първоначалното изследване на Magnetom Sola обаче са визуализирани едва 18 обекта при T1 и 15 при T2 при съответни критерии >30 и >25 . Отклонението не е гранично, а значително, което прави случайна флукутация около прага по-малко вероятно обяснение. При GE Signa HDxt визуализиране обекти са

съответно 33 и 33; при Skyra – 39 и 40; при Essenza – 35 и 33. Тези резултати отговарят на приложените критерии.

Фактът, че незадоволителният резултат при първият КК на Sola Fit се наблюдава и в двете серии, е важен. Ако отклонението беше ограничено само до една серия, би могло по-силно да се подозира специфична грешка в параметрите на конкретната секвенция. Едновременното понижение при T1 и T2 насочва към по-общ фактор, влияещ върху способността за разграничаване на нискоконтрастни структури. Такива фактори могат да бъдат недостатъчно SNR, понижена ефективност или непълна калибровка на RF системата, проблем с бобината, неравномерност на сигнала, неподходяща центровка/позициониране на фантома, неоптимални реконструкционни настройки или незавършена системна оптимизация.

Допълнителна подкрепа за подобна интерпретация предоставят PIU стойностите 89.65% и 89.45%, които са най-ниските в изследваната група, както и относително по-високите ghosting стойности 0.004 и 0.003. Важно е да се подчертае, че и двата теста формално преминават критериите. Следователно не може да се твърди, че именно по-ниската равномерност или ghosting са доказана причина за неуспеха на LCOD. Въпреки това комбинацията от три наблюдения – по-ниска PIU, по-висок PSG спрямо останалите системи и силно намалена LCOD – очертава последователна картина на по-неблагоприятно сигнално качество към момента на първия контрол.

Този резултат е в съответствие с данните на Adjeiwaah и сътр. които показват, че ACR MRI QA фантомът е чувствителен към определени промени, водещи до влошаване на качеството на MR изображенията, включително неравномерности на сигнала, електрически смущения и наличие на метален обект в боре на скенера [17].

Направеният тест представлява практическо доказателство за полезността на протокола като инструмент за откриване на технически отклонения. Първоначалният резултат е довел до последваща техническа намеса, с която да се осигури качеството на изображенията.

При интерпретацията трябва задължително да се отчете, че по време на QA теста, системата все още е била в процес на инсталация и въвеждане в експлоатация. Следователно първоначалното несъответствие не е засегнало пациенти и не е компрометирало клинични изследвания. Това обстоятелство е съществено и показва потенциалната роля на QA контрола именно преди започване на рутинна клинична работа. Ако подобно отклонение не бъде установено преди въвеждането на системата в експлоатация, намалената нискоконтрастна детектируемост теоретично би могла да има значение за визуализацията на слабо контрастни структури.

Този случай също показва защо визуалната оценка на клинични изображения сама по себе си не е достатъчна за цялостен контрол. Изображение, което изглежда приемливо при конкретна анатомична област и конкретен пациент, може да не разкрие системно понижение на способността за детекция на нискоконтрастни структури. Стандартизираният фантом създава възпроизводима задача с известни обекти и по този начин позволява откриване на отклонения, които могат да останат незабелязани при субективен преглед на клинични образи.

4.10. Анализ на артефакта при Magnetom Essenza

Второто съществено несъответствие е установено при Siemens Magnetom Essenza 1.5 T. При първоначалния QA контрол тест №29 не преминава критерия поради наблюдаван *geometric distortion* артефакт върху изображенията на ACR фантома. Същевременно при оценените клинични изображения не са регистрирани артефакти.

Този резултат има няколко важни аспекта. Първо, той показва по-високата чувствителност на стандартизираното фантомно изследване към определени технически отклонения. При клиничните изображения реалната анатомия е сложна, променлива и не разполага с предварително известна идеална геометрия. Малко или локализирано изкривяване може да остане незабелязано, особено ако не засяга очевидно анатомични граници. При ACR фантома геометрията е известна и регулярна, което улеснява разпознаването на деформации.

Второ, количествените измервания при Essenza се намират близо до допустимите граници: 145.01 mm при референтни 148 ± 3 mm за сагиталния размер и 192.90/192.70 mm при 190 ± 3 mm за аксиалните размери. Тези стойности формално преминават теста, но показват систематична тенденция към долната граница в едното измерване и горната граница в другите две. В съчетание с визуално наблюдавания геометричен артефакт това подсилва аргумента, че резултатите следва да се разглеждат комплексно.

Възможните причини за подобен артефакт включват градиентна нелинейност, отклонение в градиентната калибровка, B_0 нехомогенност, външни магнитни влияния или проблем в прилагането на геометричните корекции. Точната причина не може да бъде доказана от наличните QA данни. Следователно би било методологично неправилно да се приписва артефактът категорично на конкретен хардуерен компонент.

Международните данни също показват, че геометричните отклонения могат да бъдат свързани с конкретни технически фактори и че фантом-базираните QA тестове са подходящи за тяхното откриване. Adjeiwaah и сътр., съобщават, че некоригирана градиентна нелинейност и наличие на метален обект в гентрито на скенера водят до геометрични изкривявания [17]. Това

подкрепя интерпретацията, че наблюдаваният *geometric distortion* артефакт при Magnetom Essenza е релевантен QA резултат, въпреки че останалите количествени показатели са били в допустими граници.

Трето, този случай демонстрира необходимостта от ясна процедура при установяване на несъответствие: документиране на резултата, уведомяване на отговорните лица, техническа оценка, коригиращо действие и повторно QA измерване. Самото откриване на проблем не е достатъчно; QA системата е ефективна само ако резултатът води до проследимо действие и потвърждение на възстановеното съответствие.

4.11. Сравнение между 1.5 T и 3 T системите

Включването на една 3 T система позволява ограничено описателно сравнение с 1.5 T апаратите. Magnetom Skyra 3T показва отлични резултати по няколко показателя: висококонтрастна резолюция 1mm, PIU до 98.78%, PSG 0.0001–0.0002 и 39–40 видими нискоконтрастни обекта. Тези стойности са сред най-добрите в изследваната група.

Възможно обяснение е по-високият наличен SNR при 3 T, който може да бъде използван за по-добра пространствена резолюция и нискоконтрастна детектируемост. Все пак силата на магнитното поле не е единствената променлива. Skyra представлява конкретна система със собствена градиентна и RF архитектура, бобини и софтуер. Поради това настоящите резултати не позволяват причинно заключение, че наблюдаваното превъзходство се дължи единствено на 3 T полето.

За надеждно сравнение между 1.5 T и 3 T биха били необходими по-голям брой системи във всяка група, хармонизирани протоколи, контрол на използваните бобини и статистически анализ. Настоящото изследване следва да се разглежда като пилотно, а не като сравнително проучване на магнитни полета.

4.12. Значение на установените несъответствия за клиничната практика

Двата първоначални непреминали КК теста имат различен характер и това е важен резултат. При Magnetom Sola е установен проблем във функционалната способност за визуализиране на нискоконтрастни обекти, докато при Magnetom Essenza е наблюдаван геометричен артефакт. Следователно разработеният протокол е показал чувствителност както към понижаване на нискоконтрастното представяне, така и към пространствено-геометрично отклонение.

Потенциалното клинично значение на понижена нискоконтрастна детектируемост е свързано с възможно затруднение при визуализиране на структури с малка разлика в сигналния интензитет спрямо околните тъкани. Не може да се твърди, че това отклонение задължително би довел до пропусната диагноза, тъй като клиничното изображение зависи от множество допълнителни фактори. Въпреки това значителното понижение от необходимите >30 и >25 обекта до съответно 18 и 15 е достатъчно основание за техническа проверка преди рутинна експлоатация.

Геометричните изкривявания могат да бъдат особено значими при приложения, при които пространствената точност е критична – количествени измервания, проследяване на размери на лезии, съвместяване с други образни модалности, интервенционни процедури или използване на ЯМР данни за терапевтично планиране. Отново, настоящото изследване не доказва настъпила клинични отклонения. Резултатът обаче показва защо периодичният QA има превантивна стойност.

4.13. Методологични ограничения на изследването

Настоящото проучване има няколко ограничения, които трябва да бъдат отчетени.

На първо място, броят на изследваните системи е ограничен до пет броя, разположени в три лечебни заведения в гр. София. Поради това резултатите не могат да бъдат автоматично обобщени за всички ЯМР системи в България. Не са включени достатъчно системи от различни региони, производители и поколения, за да се направи национална оценка.

На второ място, за системите е представено еднократно QA измерване. Това позволява оценка на състоянието в конкретен момент, но не и анализ на времевата стабилност. За пълноценна QA програма е необходимо натрупване на серийни данни, чрез които да се установят базови стойности, естествена вариабилност и тенденции.

На трето място, част от тестовете са визуални или включват ръчно поставяне на ROI и линейни измервания. Това въвежда наблюдателна и операторска вариабилност. Особено чувствителни могат да бъдат LCOD, определянето на границите на рамките при дебелината на среза и изборът на малки ROI при PIU. Бъдещо развитие следва да включва автоматизиран или полуавтоматизиран анализ на DICOM изображенията.

На четвърто място, сравнението между системите е ограничено от възможни различия в хардуера, бобините и реализацията на секвенциите. Дори при стандартизирани целеви параметри отделните производители могат да използват различни технически реализации и

реконструкционни алгоритми. Следователно директното класиране на системите само по единични QA стойности трябва да се избягва.

На пето място, точните технически причини за двете първоначални несъответствия не са документирани чрез подробни сервизни диагностични протоколи в представените резултати. Поради това причините могат да бъдат обсъждани като вероятни механизми, но не и категорично доказани. Това разграничение е важно за научната коректност.

4.14. Практическо значение и възможности за развитие в България

Независимо от ограниченията, резултатите подкрепят практическата приложимост на разработения протокол. Особено показателен е фактът, че при сравнително малка пилотна група са установени две различни първоначални несъответствия, които са съобщени и е предвидена техническа проверка. Това показва, че систематичният QA може да предостави информация, която не се получава непременно от ежедневната клинична работа или от субективната оценка на изображения.

В условията на липса на унифицирана национална практика за периодичен фантом-базиран контрол при ЯМР в България разработеният протокол може да послужи като основа за по-широка програма. Практически подход би бил въвеждането на многостепенна система: по-чести кратки проверки от обучен персонал и периодични разширени оценки с участие на медицински физик. Ключово условие е резултатите да се съхраняват в структурирана база данни, така че да се проследяват във времето.

Особено подходящо би било за всяка система да се определят локални базови стойности след приемателно изпитване или след потвърждение на оптимално техническо състояние. След това периодичните резултати могат да бъдат сравнявани както с абсолютните критерии за приемливост, така и със собствената историческа стабилност на апарата. Така например понижаване на PIU от 98% до 90% може да остане над формалната граница, но да представлява значима промяна спрямо обичайното поведение на конкретната система.

Същият принцип е приложим към LCOD, PSG, дебелината на среза и геометричните размери. Използването на контролни графики би позволило разграничаване на случайна вариабилност от систематичен дрейф. Това би трансформирало QA от периодична проверка на съответствието в инструмент за превантивна поддръжка.

4.15. Обобщена интерпретация

В обобщение, резултатите показват, че изследваните ЯМР системи като цяло демонстрират добро техническо състояние и високо качество на образа, но същевременно потвърждават, че отделни отклонения могат да възникнат дори когато по-голямата част от параметрите са в допустими граници. Именно това е основният аргумент в полза на многопараметричния QA подход.

При Magnetom Sola първоначалният неуспех на нискоконтрастната детектируемост не е съпроводен с неуспех на висококонтрастната резолюция, геометричната точност или ghosting теста.

При Magnetom Essenza геометричният артефакт е установен въпреки формално приемливите линейни геометрични измервания и липсата на видими артефакти в оценените клинични изображения. Следователно нито един единичен тест не е достатъчен за цялостна оценка.

Най-същественият практически извод от настоящото изследване е, че разработеният протокол успешно изпълнява основната функция на контрола на качеството: не само да документира нормалната работа, но и да открива отклонения, да обосновава последваща техническа проверка и да позволява потвърждение на ефекта от коригиращите действия. При Magnetom Sola това е реализирано в условията на инсталация преди рутинна клинична експлоатация, поради което първоначалният неуспех не е засегнал пациенти. При Magnetom Essenza наблюдаваният геометричен артефакт е съобщен на отговорните лица и е предвиден сервизен контрол. Тези два случая демонстрират пряката практическа стойност на систематичния фантом-базиран контрол.

На тази основа може да се приеме, че разработеният протокол представлява приложима начална рамка за стандартизиране на контрола на качеството при ЯМР в български условия. Необходимо е последващо разширяване на изследването към по-голям брой лечебни заведения и системи, провеждане на серийни измервания, автоматизация на анализа и определяне на локални базови стойности. Подобно развитие би позволило преминаване от единична оценка на техническото състояние към устойчив модел за дългосрочно проследяване, ранно откриване на отклонения и превантивна оптимизация на качеството на ЯМР диагностиката.

5. Заключение

В настоящата дипломна работа беше разработен и пилотно приложен стандартизиран протокол за контрол на качеството при ЯМР системи, базиран на методологията на ACR и адаптиран към практическите условия в българските лечебни заведения. Протоколът обединява тестове за безопасност, механична функционалност и количествена оценка на качеството на образа чрез ACR Large ЯМР Phantom.

Получените резултати показват, че предложеният протокол е приложим при ЯМР системи с различно магнитно поле, различни производители и различни условия на клинична експлоатация. При повечето проведени измервания всички показатели са в границите на нормална работа, включително геометрична точност, висококонтрастна пространствена разделителна способност, дебелина и позиция на среза, равномерност на сигнала, percent signal ghosting ratio и нискоконтрастна детектируемост.

Особено важен резултат от работата е, че протоколът успя да идентифицира реални отклонения в две от изследваните системи. При един ЯМР апарат първоначално беше установено несъответствие при теста за нискоконтрастна детектируемост, а при друг — наличие на геометричен артефакт. И в двата случая отклоненията бяха съобщени на отговорните за апаратурата лица в болниците, за да се вземат корективни мерки.

Откритите несъответствия, потвърждават практическата стойност на протокола не само като средство за документиране на нормална работа, но и като инструмент за ранно откриване на технически проблеми и проследяване на ефекта от коригиращи действия.

На базата на проведеното изследване може да се заключи, че въвеждането на стандартизиран фантом-базиран контрол на качеството при ЯМР в България е необходимо, практически осъществимо и клинично значимо. Разработеният протокол може да послужи като основа за хармонизиране на QA практиките в страната, за създаване на локални базови стойности за всяка система и за бъдещо изграждане на национална рамка за периодичен контрол на качеството при ЯМР.

6. Библиография

- [1] E. M. Haacke, R. W. Brown, M. R. Thompson, and R. Venkatesan, *Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2014.
- [2] M. A. Bernstein, K. F. King, and X. J. Zhou, *Handbook of MRI Pulse Sequences*. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press, 2004.
- [3] F. Bloch, “Nuclear induction,” *Physical Review*, vol. 70, no. 7–8, pp. 460–474, 1946.
- [4] American College of Radiology, *Phantom Test Guidance for the ACR MRI Accreditation Program*. Reston, VA, USA: American College of Radiology, 2005.
- [5] American College of Radiology, *MRI Quality Control Manual*. Reston, VA, USA: American College of Radiology, 2015.
- [6] American College of Radiology, *MRI Accreditation Program Requirements*. Reston, VA, USA: American College of Radiology.
- [7] International Electrotechnical Commission, *IEC 62464-1:2018 Magnetic Resonance Equipment for Medical Imaging—Part 1: Determination of Essential Image Quality Parameters*. Geneva, Switzerland: IEC, 2018.
- [8] International Electrotechnical Commission, *IEC 60601-2-33:2022 Medical Electrical Equipment—Part 2-33: Particular Requirements for the Basic Safety and Essential Performance of Magnetic Resonance Equipment for Medical Diagnosis*. Geneva, Switzerland: IEC, 2022.
- [9] International Atomic Energy Agency, *Quality Assurance Programme for Magnetic Resonance Imaging: Diagnostic and Therapy Applications*. Vienna, Austria: IAEA, 2023.
- [10] R. R. Price, L. Axel, T. Morgan, R. Newman, W. Perman, N. Schneiders, M. Selikson, M. Wood, and S. R. Thomas, “Quality assurance methods and phantoms for magnetic resonance imaging: Report of AAPM Nuclear Magnetic Resonance Task Group No. 1,” *Medical Physics*, vol. 17, no. 2, pp. 287–295, 1990.
- [11] L. E. Och, G. D. Clarke, W. T. Sobol, C. W. Rosen, and S. K. Mun, “Acceptance testing of magnetic resonance imaging systems: Report of AAPM Nuclear Magnetic Resonance Task Group No. 6,” *Medical Physics*, vol. 19, no. 1, pp. 217–229, 1992.
- [12] E. Kanal, A. J. Barkovich, C. Bell, et al., “ACR guidance document on MR safe practices: 2013,” *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, vol. 37, no. 3, pp. 501–530, 2013.

- [13] American College of Radiology, *ACR Manual on MR Safety*. Reston, VA, USA: American College of Radiology, 2024.
- [14] P. S. Tofts, Ed., *Quantitative MRI of the Brain: Measuring Changes Caused by Disease*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.
- [15] C. C. Chen, Y. L. Wan, Y. Y. Wai, and H. L. Liu, “Quality assurance of clinical MRI scanners using ACR MRI phantom: preliminary results,” *Journal of Digital Imaging*, vol. 17, no. 4, pp. 279–284, 2004.
- [16] T. M. Ihalainen et al., “MRI quality assurance using the ACR phantom in a multi-unit imaging center,” *Acta Oncologica*, vol. 50, no. 6, pp. 966–972, 2011.
- [17] M. Adjeiwaah, A. Garpebring, and T. Nyholm, “Sensitivity analysis of different quality assurance methods for magnetic resonance imaging in radiotherapy,” *Physics and Imaging in Radiation Oncology*, vol. 13, pp. 21–27, 2020.

Приложение №1 – Приет за постер-презентация доклад в European Congress of Medical Physics, Valencia, Spain 2026

Id.	Code	Title	Type	Authors	Status
Info 109		Pilot Multicenter Study of an ACR Phantom-Based MRI Quality Assurance Protocol in Bulgarian Clinical Practice	POSTER	Gueorgui Gueorguiev , Jeannette Milusheva, Hristiana Stefanova, Emil Georgiev	Accepted

Background and Aims:

Standardized MRI quality assurance (QA) protocols are not uniformly implemented in Bulgaria. This study aimed to develop and test a QA protocol based on the American College of Radiology (ACR) MRI phantom methodology and evaluate its feasibility for multicenter implementation across Bulgarian healthcare facilities.

Materials and Methods:

A QA protocol using the ACR large MRI phantom was implemented on clinical scanners from different vendors and field strengths. The protocol included safety and mechanical checks together with quantitative evaluation of geometric accuracy, spatial resolution, slice thickness accuracy, slice position accuracy, image intensity uniformity, percent signal ghosting ratio, and low-contrast object detectability according to ACR recommendations.

Results:

Pilot measurements on three MRI systems demonstrated successful implementation within routine clinical workflow. Geometric accuracy ranged from 146–148 mm and 188–191 mm for orthogonal dimensions. Slice thickness ranged from 4.85–5.54 mm for a nominal 5 mm slice. Image intensity uniformity varied between 89.4% and 96.6%, while percent signal ghosting ratios remained well below the ACR tolerance of 0.03. High-contrast spatial resolution reached ≤ 1 mm and low-contrast detectability exceeded acceptance criteria, demonstrating stable image quality across scanners. The slice position accuracy test gave bar length difference of 0.65–4.76 mm, which was below the ACR acceptable limit of 5 mm.

Conclusion:

These pilot results confirm the feasibility of implementing a standardized ACR phantom-based MRI QA protocol in Bulgarian clinical practice. Additional measurements are ongoing and are expected to include approximately ten MRI scanners by summer 2026, enabling systematic inter-scanner comparison and supporting harmonized MRI QA practices.

Key Words:

MRI quality assurance; ACR phantom; image quality evaluation;