

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN 8334-3-1: 2010

IEC 62226-3-1: 2007

Xuất bản lần 1

**PHƠI NHIỄM TRONG TRƯỜNG ĐIỆN HOẶC TRƯỜNG TỪ
Ở DẢI TẦN SỐ THẤP VÀ TẦN SỐ TRUNG GIAN –
PHƯƠNG PHÁP TÍNH MẬT ĐỘ DÒNG ĐIỆN VÀ TRƯỜNG
ĐIỆN CẢM ỨNG BÊN TRONG CƠ THỂ NGƯỜI –
PHẦN 3-1: PHƠI NHIỄM TRONG TRƯỜNG ĐIỆN –
MÔ HÌNH GIẢI TÍCH VÀ MÔ HÌNH ĐÁNH SỐ HAI CHIỀU**

*Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range –
Methods for calculating the current density and internal electric field induced
in the human body –*

Part 3-1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models

HÀ NỘI – 2010

Mục lục

	Trang
Lời nói đầu	4
Lời giới thiệu	5
1 Phạm vi áp dụng	7
2 Phơi nhiễm trong trường điện	7
3 Qui trình chung	10
3.1 Hệ số hình dạng	10
3.2 Qui trình	10
4 Mô hình cơ thể người.....	11
4.1 Giới thiệu chung.....	11
4.2 Diện tích bề mặt.....	11
4.3 Mô hình nửa phỏng cầu	12
4.4 Mô hình cơ thể đối xứng qua trục.....	14
5 Tính dòng điện cảm ứng.....	15
5.1 Yêu cầu chung	15
5.2 Nửa phỏng cầu.....	15
5.3 Mô hình đối xứng qua trục.....	19
5.4 So sánh mô hình giải tích và mô hình đánh số.....	25
6 Ảnh hưởng của các tham số điện	26
6.1 Yêu cầu chung	26
6.2 Ảnh hưởng của hằng số điện môi.....	26
6.3 Ảnh hưởng của độ dẫn điện	26
6.4 Độ dẫn không đồng nhất	27
7 Phép đo dòng điện cảm ứng bởi trường điện	27
7.1 Yêu cầu chung.....	27
7.2 Dòng điện chạy xuống đất.....	27
Phụ lục A (qui định) – Cách giải bằng giải tích đối với phỏng cầu trong trường điện đồng nhất	29
Phụ lục B (qui định) – Mô hình đối xứng của trục của cơ thể người.....	32
Phụ lục C (tham khảo) – Mô hình cơ thể trẻ em	38
Phụ lục D (tham khảo) – Ví dụ về sử dụng tiêu chuẩn này	40
Phụ lục E (tham khảo) – Phương pháp tính đánh số	45
Thư mục tài liệu tham khảo	53

Lời nói đầu

TCVN 8334-3-1: 2010 hoàn toàn tương đương với IEC 62226-3-1: 2007;

TCVN 8334-3-1: 2010 do Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc gia TCVN/TC/E9
Tương thích điện từ biên soạn, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất
lượng đề nghị, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Lời giới thiệu

Mối quan tâm của công chúng liên quan đến phơi nhiễm của con người trong trường điện và trường từ khiến các tổ chức quốc tế và quốc gia cần đề xuất các giới hạn dựa trên ảnh hưởng bất lợi đã được thừa nhận.

Tiêu chuẩn này áp dụng cho dải tần số mà trong đó giới hạn phơi nhiễm dựa trên cảm ứng điện áp hoặc dòng điện trong cơ thể người khi bị phơi nhiễm trong trường điện hoặc trường từ. Dải tần số này bao trùm tần số thấp và tần số trung gian, đến 100 kHz. Một số phương pháp được mô tả trong tiêu chuẩn này có thể được sử dụng ở tần số cao hơn trong các điều kiện qui định.

Giới hạn phơi nhiễm dựa trên thực nghiệm sinh học và y học về các hiện tượng cảm ứng cơ bản này, thường được gọi là "giới hạn cơ bản". Các giới hạn cơ bản này chứa đựng cả các yếu tố an toàn.

Đại lượng điện cảm ứng không thể đo trực tiếp được, vì vậy các giới hạn cũng bắt nguồn từ các đề xuất đơn giản hoá. Các giới hạn này, được gọi "mức tham chiếu", được đưa ra dưới dạng trường điện và trường từ. Các giới hạn này dựa trên mô hình ghép nối rất đơn giản giữa trường bên ngoài và cơ thể. Các giới hạn này cũng mang tính thận trọng.

Mô hình phức tạp dùng để tính dòng điện cảm ứng trong cơ thể đã được sử dụng và đối tượng của nhiều xuất bản khoa học. Các mô hình sử dụng tập hợp các phép tính trường điện từ đánh số ba chiều và cấu trúc mô hình chi tiết bên ngoài có các đặc tính điện riêng cho từng chuỗi liên quan bên trong cơ thể. Tuy nhiên các mô hình này vẫn đang triển khai; dữ liệu có sẵn về tính dẫn điện hiện nay có nhiều thiếu sót. Phân tích về không gian của các mô hình vẫn đang được hoàn thiện. Do đó, các mô hình này vẫn được tính đến trong phạm vi nghiên cứu khoa học và ở hiện tại, nó không được coi là thành quả đạt được từ các mô hình đó nên chưa biết đến khi nào được đưa vào các tiêu chuẩn. Tuy nhiên, thừa nhận rằng các mô hình này có thể và đã đóng góp hữu ích cho quá trình tiêu chuẩn hoá, đặc biệt đối với các tiêu chuẩn sản phẩm mà ở đó trường hợp phơi nhiễm cụ thể được quan tâm. Khi kết quả từ mô hình này được sử dụng trong tiêu chuẩn, vẫn cần định kỳ xem xét lại các kết quả để đảm bảo chúng liên tục phản ánh tình trạng khoa học đương đại.

Bộ tiêu chuẩn TCVN 8334 (IEC 62226) hiện nay có các tiêu chuẩn quốc gia sau:

- 1) TCVN 8334-1: 2010 (IEC 62226-1:2004), Phơi nhiễm trong trường điện hoặc trường từ ở dải tần số thấp và tần số trung gian – Phương pháp tính mật độ dòng điện và trường điện cảm ứng bên trong cơ thể người – Phần 1: Yêu cầu chung
- 2) TCVN 8334-3-1: 2010 (IEC 62226-3-1: 2007), Phơi nhiễm trong trường điện hoặc trường từ ở dải tần số thấp và tần số trung gian – Phương pháp tính mật độ dòng điện và trường điện cảm ứng bên trong cơ thể người – Phần 3-1: Phơi nhiễm trong trường điện – Mô hình giải tích và mô hình đánh số hai chiều

Bộ tiêu chuẩn IEC 62226 còn có tiêu chuẩn sau:

TCVN 8334-3-1 : 2010

IEC 62226-2-1: 2004, Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models (Phơi nhiễm trong trường điện hoặc trường từ ở dải tần số thấp và tần số trung gian – Phương pháp tính mật độ dòng điện và trường điện cảm ứng bên trong cơ thể người – Phần 2-1: Phơi nhiễm trong trường từ – Mô hình hai chiều)

Phơi nhiễm trong trường điện hoặc trường từ ở dải tần số thấp và tần số trung gian – Phương pháp tính mật độ dòng điện và trường điện cảm ứng bên trong cơ thể người –

Phần 3-1: Phơi nhiễm trong trường điện – Mô hình giải tích và mô hình đánh số hai chiều

*Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range –
Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body –
Part 3-1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models*

1 Phạm vi áp dụng

Tiêu chuẩn này áp dụng cho dải tần số mà trong đó giới hạn phơi nhiễm dựa trên cảm ứng điện áp hoặc dòng điện trong cơ thể người khi bị phơi nhiễm ở trường điện.

Tiêu chuẩn này xác định chi tiết về hệ số ghép nối K - được giới thiệu trong bộ TCVN 8334 (IEC 62226) để đánh giá phơi nhiễm trong các trường hợp phơi nhiễm phức tạp, ví dụ như trường từ không đồng nhất hoặc trường điện xáo trộn - đối với trường hợp mô hình đơn giản của cơ thể người, bị phơi nhiễm trong trường điện đồng nhất. Hệ số ghép nối K có các cách giải thích vật lý khác nhau phụ thuộc vào việc hệ số này liên quan đến phơi nhiễm trường điện hoặc trường từ. Hệ số này được gọi là "hệ số hình dạng dùng cho trường điện".

Có thể sử dụng tiêu chuẩn này khi trường điện được coi là đồng nhất, với tần số lên đến 100 kHz.

Trường hợp phơi nhiễm trong trường điện "đồng nhất" này thường xuất hiện ở vùng xung quanh hệ thống điện cao áp trên không. Vì lý do đó, các minh họa được đưa ra trong tiêu chuẩn này là minh họa ở tần số công nghiệp (50 Hz và 60 Hz).

2 Phơi nhiễm trong trường điện

Trường điện xoay chiều được phát ra bởi các dây dẫn mang điện (nghĩa là chịu tác động của điện áp). Ở vùng xung quanh sát với các thiết bị điện gia dụng, như bóng đèn, công tắc, máy trộn thực phẩm và bàn là, có thể xuất hiện cường độ trường điện cục bộ khoảng 100 V/m. Các trường này không đồng nhất

TCVN 8334-3-1 : 2010

nhưng cường độ của chúng ở thấp hơn nhiều so với mức được khuyến cáo trong hướng dẫn về an toàn do đó không cần tính dòng điện cảm ứng trong trường hợp phơi nhiễm này.

Cường độ trường điện cao hơn có thể xuất hiện ở vùng xung quanh thiết bị điện cao áp như đường dây tải điện. Ở dải tần số được đề cập trong tiêu chuẩn này, phơi nhiễm từ đường dây điện được coi là nguồn phơi nhiễm đáng kể duy nhất đối với công chúng liên quan đến các giới hạn hướng dẫn an toàn.

Các hướng dẫn về phơi nhiễm của con người trong trường điện thường được thể hiện dưới dạng mật độ dòng điện cảm ứng hoặc trường điện bên trong. Các đại lượng này không thể đo được trực tiếp và mục đích của tiêu chuẩn này là đưa ra sự hướng dẫn để đánh giá các đại lượng cảm ứng trong cơ thể người do có trường điện bên ngoài (môi trường) E_0 .

Mật độ dòng điện cảm ứng J và trường điện bên trong E_i có liên quan mật thiết với nhau qua công thức:

$$J = \sigma \cdot E_i \quad (1)$$

trong đó σ là độ dẫn của mô cơ thể cần xem xét.

Để đơn giản hoá, nội dung của tiêu chuẩn này thể hiện dưới dạng mật độ dòng điện cảm ứng J , từ đó có thể dễ dàng suy ra giá trị của trường điện bên trong E_i bằng cách sử dụng công thức trên đây.

Tất cả các phép tính trong tiêu chuẩn này sử dụng phép gần đúng tần số thấp trong đó dòng điện chuyển dịch trong cơ thể là không đáng kể sao cho $\varepsilon\omega/\sigma$ nhỏ hơn 1. Phép gần đúng này đã được kiểm tra bằng cách sử dụng dữ liệu về mô đã được công bố [29,31] ¹⁾ trong dải tần số thấp và thấy là có hiệu lực đối với tần số lên đến 100 kHz và có thể có hiệu lực ở tần số cao hơn.

Các tính toán dựa trên mô hình đánh số phức tạp của cơ thể người [24] cũng chứng tỏ rằng giả thiết này có hiệu lực ở các tần số cao hơn 100 kHz bằng cách cho thấy mối liên quan giữa mật độ dòng điện cảm ứng trong cơ thể và tích của tần số với trường điện bên ngoài hầu như không thay đổi trong khoảng từ 50 Hz đến 1 MHz, và chỉ thay đổi không đáng kể ở tần số 10 MHz.

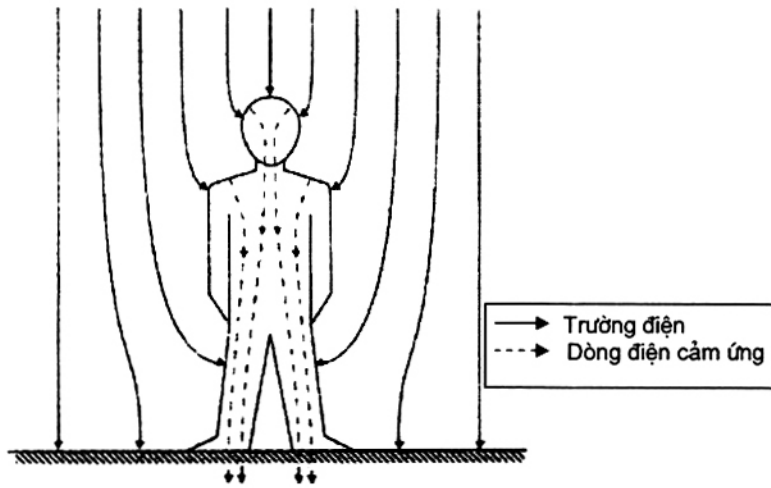
Có thể sử dụng mô hình giải tích cho các trường hợp tính đơn giản.

Trường điện gây ra sự dịch chuyển của các điện tích trong vật dẫn (kể cả cơ thể sống) và do các trường này thay đổi nên các điện tích di chuyển qua lại. Kết quả là có dòng điện xoay chiều "cảm ứng" bên trong vật dẫn. Dòng điện này chỉ phụ thuộc vào:

- hình dạng và kích cỡ của vật dẫn;
- các đặc tính (độ lớn, phân cực, mức độ không đồng nhất, v.v..) của trường không xáo trộn (trường được đo khi không có mặt bất kỳ vật dẫn nào);
- tần số của trường;
- sự thay đổi của độ dẫn vật thể (trong môi chất đồng nhất, mật độ dòng điện cảm ứng bởi trường điện không phụ thuộc vào độ dẫn).

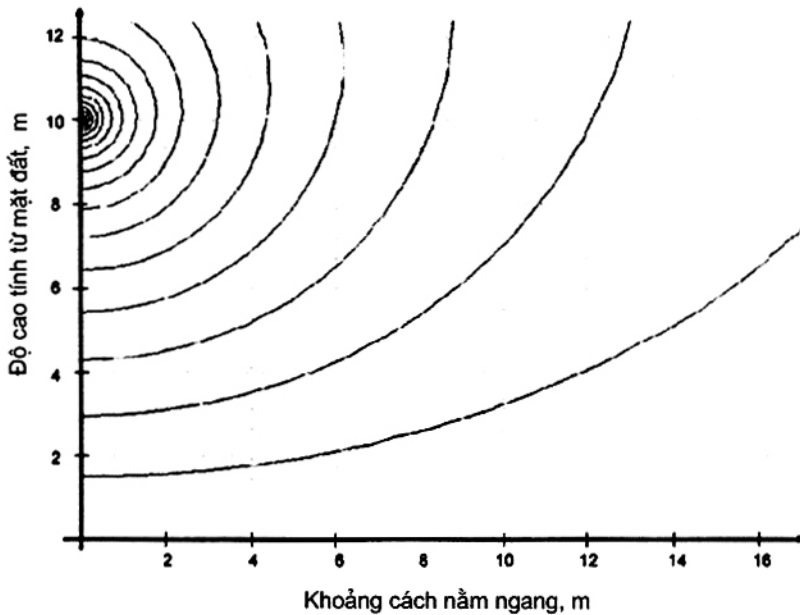
¹⁾ Các con số trong dấu ngoặc kép liên quan đến Thư mục tài liệu tham khảo.

Hình 1 minh họa hiện tượng cảm ứng này đối với trường hợp cơ thể tiếp xúc điện với đất.



Hình 1 – Minh họa về hiện tượng dòng điện cảm ứng bởi trường điện trong cơ thể người đứng trên mặt đất

Trường hợp điển hình về phơi nhiễm trong trường điện là trường hợp công chúng bị phơi nhiễm ở bên dưới đường dây tải điện cao áp. Trong trường hợp này, khoảng cách giữa nguồn trường và cơ thể người là lớn và trường trong khu vực gần với mặt đất có thể coi là đồng nhất, khi không có bất kỳ vật dẫn nào (xem Hình 2).



Hình 2 – Các đường sức điện thế của trường điện phát ra bởi một dây mang điện khi không có mặt bất kỳ vật thể nào (tất cả các khoảng cách đều tính bằng mét)

3 Qui trình chung

3.1 Hệ số hình dạng

Trong dải tần số thấp và tần số trung gian, mối liên quan giữa dòng điện cảm ứng trong cơ thể người (J) và trường điện đồng nhất (E_0) có thể rút gọn thành:

$$J = K_E \cdot f \cdot E_0 \quad (2)$$

Trong đó:

f là tần số;

E_0 là độ lớn trường điện không xáo trộn;

K_E được xác định là " hệ số hình dạng dùng cho trường điện".

K_E phụ thuộc vào kích cỡ, độ dẫn, hình dáng và vị trí của mô hình cơ thể người. K_E cũng phụ thuộc vào vị trí trong cơ thể mà tại đó mật độ dòng điện cảm ứng được đánh giá. K_E không phụ thuộc vào tần số để đánh giá phân tích dòng điện cảm ứng được tạo bởi trường điện (xem Phụ lục A).

K_E được tính theo đơn vị $A \cdot s \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$ hoặc Fara trên mét (F/m), có liên quan đến thực tế là việc phơi nhiễm trong trường điện tương ứng với ghép nối điện dung giữa nguồn trường và vật dẫn bị phơi nhiễm trong trường.

3.2 Qui trình

Mật độ dòng điện bên trong một cơ thể có thể được đánh giá bằng phép giải tích, theo qui trình ba giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên là tính mật độ dòng điện trong một nửa phỏng cầu, có kích thước được lựa chọn để đại diện tốt nhất cho cơ thể cụ thể. Như được thể hiện trong 5.3 của tiêu chuẩn này, mật độ dòng điện tuy không đồng nhất trong cả khối phỏng cầu mà phụ thuộc vào tỉ số L/R là nửa trục dài và nửa trục ngắn.

Giai đoạn thứ hai là sử dụng mô hình trục đối xứng thực của cơ thể người để xác định mật độ dòng điện là hàm của các vị trí theo phương thẳng đứng của cơ thể.

Giai đoạn thứ ba là chuyển đổi mật độ dòng điện trung bình ở vị trí thẳng đứng cụ thể sang mật độ dòng điện cục bộ trong các mô khác nhau ở độ cao đó. Hướng dẫn y tế về phơi nhiễm trong trường điện từ liên quan cụ thể đến mật độ dòng điện trong hệ thần kinh trung ương, do đó các vùng đặc biệt quan trọng trong cơ thể là dây thần kinh trong cột sống ở cổ, vì cổ có tiết diện nhỏ nên dòng điện tập trung ở vùng đó.

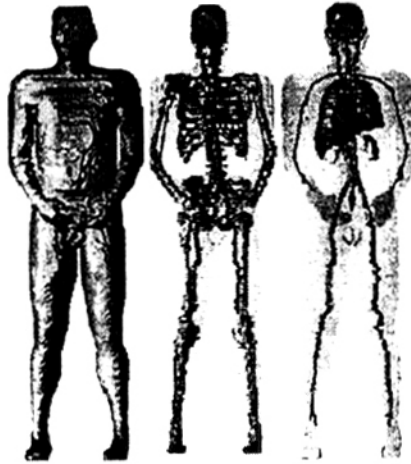
Dòng điện cảm ứng được tính đối với nam giới, nữ giới cũng như với trẻ em bằng cách sử dụng các giá trị chuẩn về chiều cao, khối lượng và diện tích bề mặt được công bố trong ICRP [38]. Thông tin đầy đủ được đưa ra ở đây để áp dụng phương pháp này cho người có khối lượng và chiều cao bất kỳ.

Các phép tính đánh số cũng được đưa ra để chứng minh tính hiệu lực của qui trình giải tích.

4 Mô hình cơ thể người

4.1 Giới thiệu chung

Trong tài liệu khoa học, nhiều mô hình có độ phức tạp khác nhau đã được sử dụng cho việc đánh giá dòng điện và trường bên trong được cảm ứng bởi trường điện hoặc trường từ (Hình 3). Ví dụ về các tính toán phức tạp như vậy được đưa ra trong Thư mục tài liệu tham khảo. Cần phải nhấn mạnh rằng các tính toán này phải được thực hiện bằng cách sử dụng các phần mềm chuyên dụng, đòi hỏi khả năng chuyên môn ở mức độ rất cao và không phổ biến. Vì thế, kỹ thuật tính toán như vậy được coi là không thích hợp cho mục đích tiêu chuẩn hoá.



Hình 3 – Mô hình cơ thể thực tế

Các tính toán giải tích có thể thực hiện khi sử dụng mô hình đơn giản, như mô hình phỏng cầu trong trường điện đồng nhất.

4.2 Diện tích bề mặt

Diện tích bề mặt của một cơ thể (SB) được sử dụng để chia tỉ lệ cho cả mô hình cơ thể phỏng cầu và mô hình cơ thể đối xứng qua trục ở các cơ thể có kích thước khác nhau. Diện tích bề mặt phụ thuộc vào chiều cao và khối lượng của cơ thể. Báo cáo của ICRP [38], *Dữ liệu giải phẫu và sinh lý học cơ bản để sử dụng trong phòng chống phóng xạ: Giá trị tham chiếu, cung cấp thuật toán để tính diện tích bề mặt tổng (SB_T) của người là hàm của chiều cao L (tính bằng mét) và khối lượng M (tính bằng kg):*

$$SB_T = 0,1644M^{0,51456}L^{0,42246} \quad (3)$$

Trong tiêu chuẩn này, chỉ tính diện tích bề mặt bao phủ phía ngoài của cơ thể xấp xỉ bằng 82 % diện tích bề mặt tổng SB_T. Việc giảm 18 % bao gồm 3 % là gan bàn chân, 6 % là bề mặt tiếp xúc của hai chân và 8 % là bề mặt phía trong của hai cánh tay và bàn tay còn 1 % dành cho đáy chậu. Vì thế, diện tích bề mặt bị giảm (SB_R) là:

$$SB_R = 0,82SB_T \quad (4)$$

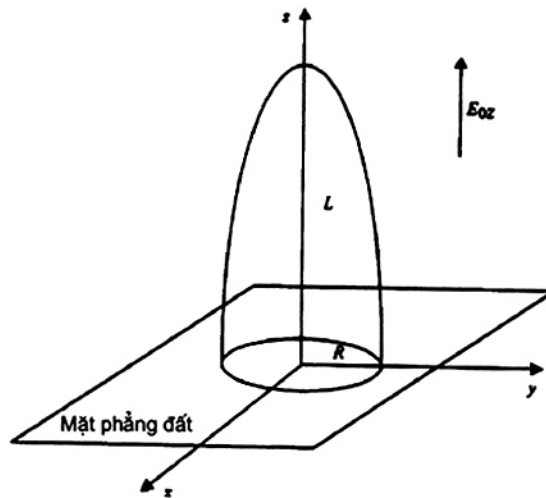
Bảng 1 đưa ra các kết quả của nam giới chuẩn và của nữ giới chuẩn, được giới thiệu trong 4.4 và Phụ lục B.

Bảng 1 – Dữ liệu về nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn

	Nam giới chuẩn	Nữ giới chuẩn
Chiều cao, m	1,76	1,63
Khối lượng, kg	73	60
Diện tích bề mặt tổng SB_T , m ²	1,889	1,662
Diện tích bề mặt bị giảm SB_R , m ²	1,557	1,363

4.3 Mô hình nửa phỏng cầu

Để tính mật độ dòng điện cảm ứng bên trong cơ thể người đứng trên mặt phẳng dẫn, cần tạo mô hình ảnh xạ của cơ thể trong đất. Do đó, cơ thể được thể hiện bằng một nửa phỏng cầu (Hình 4) và phần ảnh xạ được thể hiện bằng nửa còn lại (Hình 7). Nửa trục dài L của phỏng cầu được lấy theo chiều cao của người đại diện.



Hình 4 – Biểu đồ nửa phỏng cầu mô phỏng một người đứng trên mặt phẳng có điện thế bằng không

Nửa trục ngắn (tức là bán kính) R được chọn để tạo ra dòng điện tổng giống nhau chạy vào đất qua bàn chân khi cơ thể tiếp xúc với đất giống như đối với cơ thể mà nó đại diện. Điều này đạt được bằng cách đảm bảo rằng phỏng cầu có diện tích bề mặt lớp bao bọc phía ngoài giống như với cơ thể mà nó đại diện.

Diện tích bề mặt SB_S của một nửa phỏng cầu có chiều cao L và bán kính R được cho bằng:

$$SB_S = \pi R^2 \left[1 + \frac{L}{R} \frac{\arcsin(e)}{e} \right] \quad (5)$$

trong đó e là độ lệch tâm:

$$e = \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2}}$$

R được xác định từ khối lượng M và L bằng cách tính công thức (5) theo R , với $SB_s = SB_R$, và trong đó SB_R được cho bởi công thức (3) và (4). Do đó

$$R = -\frac{B}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \frac{SB_s}{\pi}} \quad (6)$$

trong đó

$$B = L \frac{\arcsin(e)}{e}$$

B là hàm của R , nhưng vì $\arcsin(e)/e$ chỉ thay đổi từ từ theo L/R , như thể hiện trong Bảng 2, B cũng chỉ thay đổi từ từ theo L/R , và do đó có thể xác định B bằng cách sử dụng giá trị gần đúng đối với L/R .

Bảng 2 – Giá trị của $\arcsin(e)/e$ đối với các giá trị L/R khác nhau

L/R	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8	10
Arctsin(e)/e	1,469	1,471	1,473	1,474	1,476	1,478

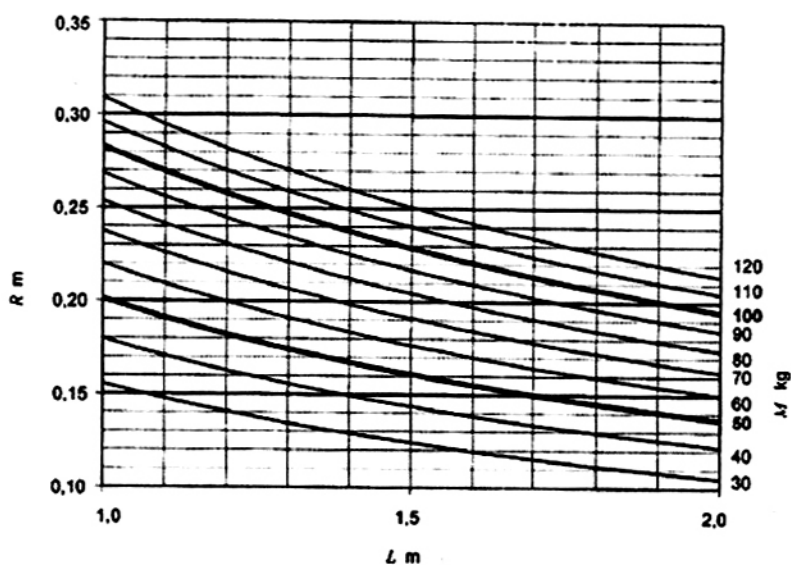
Với $L/R = 9,8$ sẽ tính được

$$B = 1,476 L$$

Đặt B vào công thức (6) để tính R theo L và SB_s :

$$R = -0,738L + \sqrt{0,545L^2 + \frac{SB_s}{\pi}} \quad (7)$$

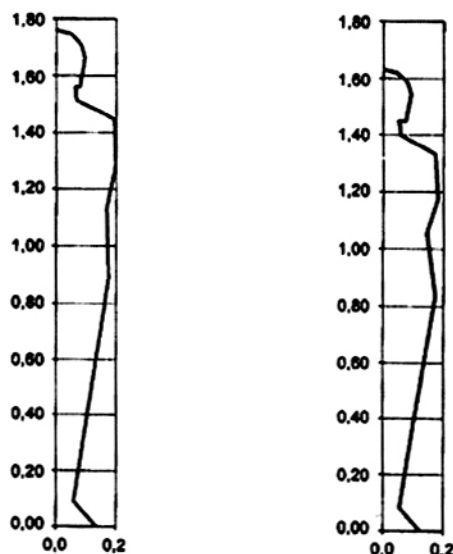
Hình 5 thể hiện kết quả bằng đồ thị. Có thể sử dụng đồ thị này để tìm bán kính R theo chiều cao L và khối lượng M của một người. Ví dụ, nam giới chuẩn có khối lượng là 73 kg và chiều cao là 1,76 m, thì bán kính R là 0,178 m và L/R là 9,86.



Hình 5 - Bán kính phỏng cầu tương đương R, theo chiều cao L, và đối với khối lượng khác nhau M

4.4 Mô hình cơ thể đối xứng qua trục

Mô hình cơ thể đối xứng qua trục thể hiện các đặc trưng thiết yếu của cơ thể: chiều cao, diện tích bề mặt tổng, kích thước cổ và biên dạng thẳng đứng gần đúng. Tuy nhiên, mô hình này không thể là đại diện hoàn hảo cho cơ thể vì cơ thể không đối xứng qua trục. Hình 6 minh họa mặt cắt xuyên tâm của mô hình đối xứng qua trục đối với mô hình nam giới chuẩn và mô hình nữ giới chuẩn.



Hình 6 – Mô hình cơ thể đối xứng qua trục đối với nam giới chuẩn (bên trái) và nữ giới chuẩn (bên phải)

Phụ lục B mô tả dữ liệu từ việc khảo sát phép đo ở 2 208 người nữ và 1 174 người nam được lựa chọn làm mẫu đại diện từ quân đội Mỹ, để xây dựng mô hình đối xứng qua trục. Mô hình được xác định bởi 13 tọa độ (bán kính, chiều cao).

5 Tính dòng điện cảm ứng

5.1 Yêu cầu chung

Mô hình giải tích để xác định mối liên quan giữa dòng điện cảm ứng trong một cơ thể dẫn và trường điện bên ngoài thường dựa trên giả thiết đơn giản nhất, đó là trường bên ngoài là đồng nhất, ở một tần số và cơ thể là đồng nhất có hình dạng có thể được mô tả theo phép giải tích (như ở trường hợp hình cầu, phỏng cầu, v..v..). Do đó, không thể đưa vào tính toán thực tế một cách dễ dàng vì cơ thể người có cấu trúc không đồng nhất cùng với hình dạng phức tạp.

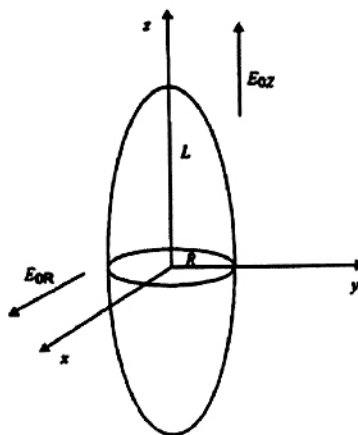
Tuy nhiên, có thể sử dụng mô hình giải tích đối với các tính toán đơn giản và/hoặc dùng để công nhận các phép tính đánh số.

Trong trường hợp cụ thể của mô hình đồng nhất xây dựng trong tiêu chuẩn này, mật độ dòng điện cảm ứng không phụ thuộc vào độ dẫn điện và hằng số điện môi (xấp xỉ tần số thấp).

5.2 Nửa phỏng cầu

5.2.1 Bằng giải tích

Trong Phụ lục A, phép giải tích chi tiết đối với phỏng cầu trong trường điện đồng nhất được thể hiện là một hàm số của hình dạng phỏng cầu và các tham số về điện và còn là hàm của độ lớn và hướng của vectơ trường điện (Hình 7). Việc thể hiện phỏng cầu tương đương với nửa phỏng cầu khi có mặt phẳng đất như giải thích ở 4.3.



Hình 7 – Phỏng cầu dẫn điện đặt trong trường điện

TCVN 8334-3-1 : 2010

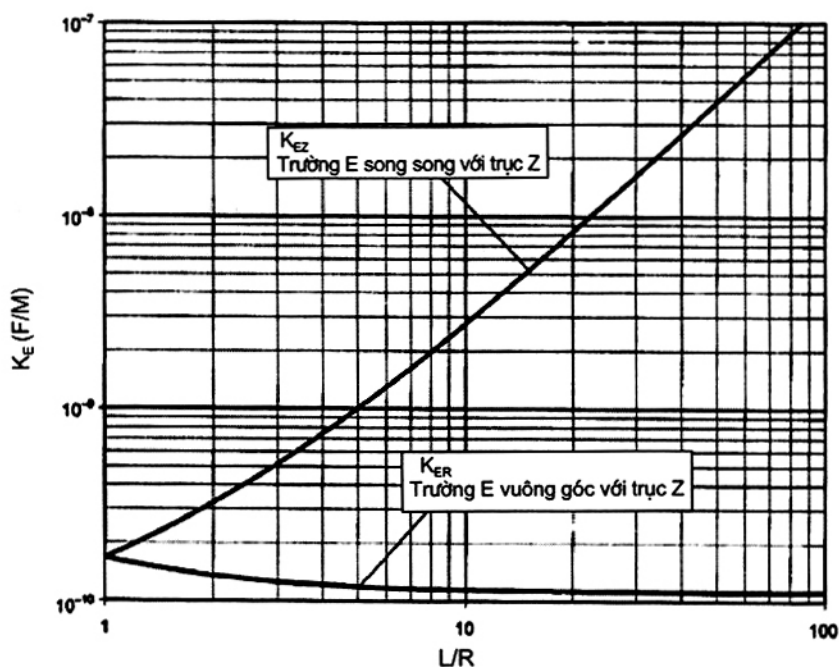
L là chiều dài nửa trục dài (trục quay) của phỏng cầu (trục Z), R là chiều dài nửa trục ngắn của phỏng cầu (R cũng là bán kính mặt cắt tròn của phỏng cầu ở mặt phẳng đối xứng (mặt phẳng XY)).

Tính hệ số hình dạng cho trường điện K_E với 2 hướng của vectơ trường: E_0 song song với trục Z (do đó, K_E và E_0 được gọi là K_{EZ} và E_{0Z}) và E_0 vuông góc với trục Z (do đó K_E và E_0 được gọi là K_{ER} và E_{0R}).

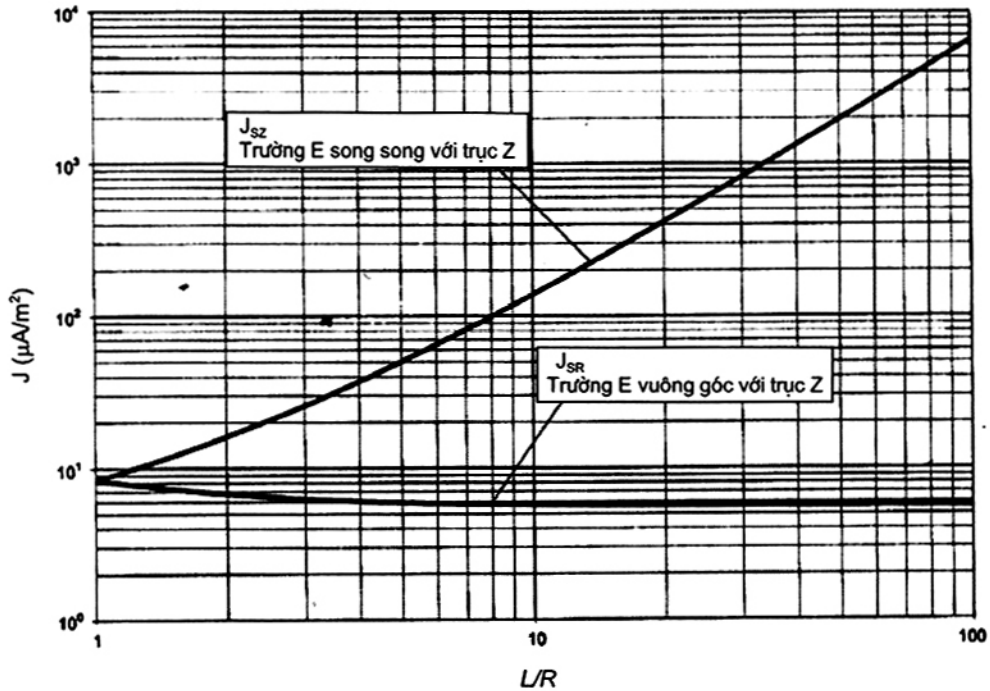
Kết quả của tính toán giải tích này được tổng hợp trong Hình 8 và Hình 9 dưới đây.

Hình 8 đưa ra kết quả tính toán K_{EZ} và K_{ER} dưới dạng đồ thị, là hàm của tỉ số L/R (tham số hình dạng)

Hình 9 đưa ra kết quả của tính toán giải tích của mật độ dòng điện cục bộ, với độ lớn trường là 1 kV/m ở 50 Hz.



Hình 8 – Tính toán hệ số hình dạng đối với trường điện K_E của phỏng cầu đặt trong trường điện không xáo trộn



Hình 9 – Mật độ dòng điện J_s cảm ứng bởi trường điện không xáo trộn (1 kV/m, 50 Hz) trong một phỏng cầu theo tham số L/R (các giá trị tính theo $\mu\text{A}/\text{m}^2$)

Ứng dụng trực tiếp:

Nếu xét các giá trị dành cho nam giới chuẩn (xem 4.3) có $L/R = 9,86$ và $L = 1,76$ m, bị phơi nhiễm trong trường điện thẳng đứng có độ lớn 1 kV/m ở 50 Hz, thì các đường cong ở Hình 8 và Hình 9 chỉ ra:

$$K_{EZ} \cong 2,68 \times 10^{-9} \text{ A.s/V.m}$$

và

$$J_{SZ} = K_{EZ} \cdot f \cdot E_{0Z} \cong 0,134 \text{ mA}/\text{m}^2$$

5.2.2 Đánh số

Có thể sử dụng các phương pháp khác nhau để xác định dòng điện cảm ứng trong vật dẫn bởi trường điện bên ngoài E_0 . Trong các phép tính dưới đây, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn:

Tham số vật lý đối với không khí là [27, 33, 51]:

$$\epsilon_r = 1$$

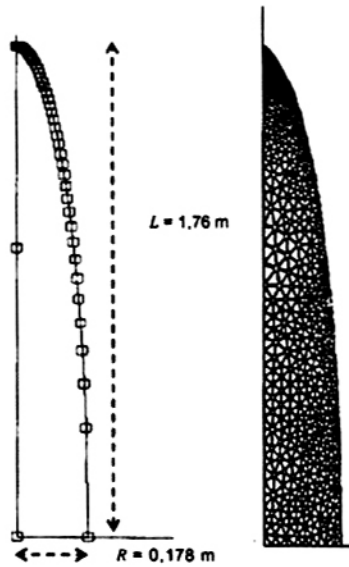
$$\sigma = 0 \text{ S/m}$$

Đặc trưng của mô hình nửa phỏng cầu là:

$$L = 1,76 \text{ m} \quad \epsilon_r = 10^5$$

$$R = 0,178 \text{ m} \quad \sigma = 0,2 \text{ S/m}$$

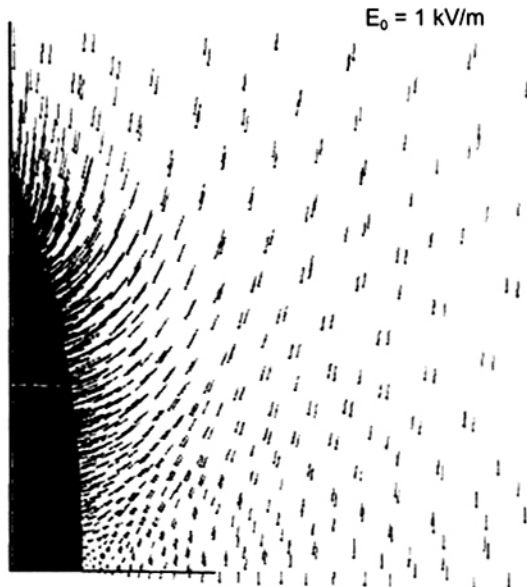
Trong ví dụ được cho ở đây, mắt lưới của nửa phỏng cầu bao gồm 2 744 phần tử bề mặt (xem Hình 10).



Hình 10 – Kích thước và mắt lưới của nửa phỏng cầu

Trong phạm vi tính toán, trường điện 50 Hz bên ngoài (E_0) được phát ra bởi một điện cực phẳng đặt cách mặt phẳng đất 10 m, có điện thế 10 000 V. Giả sử vùng tính toán là đối xứng qua trục.

Hình 11 thể hiện trường điện xáo trộn trong không khí, gần với nửa phỏng cầu. Nửa phỏng cầu làm biến dạng đường sức của trường điện, làm cho nó trở nên vuông góc với bề mặt của phỏng cầu. Nếu không có nửa phỏng cầu hoặc ở cách xa phỏng cầu, thì đường sức của trường điện là thẳng đứng.



Hình 11 – Sự biến dạng đường sức của trường điện tần số công nghiệp gần với nửa phỏng cầu dẫn

Mật độ dòng điện tại tâm của nửa phỏng cầu rất giống với giá trị mật độ dòng điện theo tính toán giải tích. Sự khác nhau dọc theo trục thẳng đứng là nhỏ hơn 1 % và mật độ dòng điện coi như không đổi. Từ đó, có thể coi mô hình đánh số đơn giản này đưa ra các kết quả giống với các kết quả của phép giải tích.

5.3 Mô hình đối xứng qua trục

5.3.1 Bảng giải tích

Bảng 3 đưa ra các giá trị thu được khi tính mật độ dòng điện trong phỏng cầu. Diện tích bề mặt ở hàng thứ ba được tính theo chiều cao và khối lượng bằng cách sử dụng công thức (3). Ở hàng kế tiếp, áp dụng hệ số 0,82 (công thức (4)) để loại bỏ bề mặt bao phủ không ở phía ngoài khi đang đứng. Ở hàng tiếp theo, bằng cách sử dụng bề mặt bao phủ phía ngoài và công thức (7) tính bán kính R cho một nửa phỏng cầu có cùng diện tích bề mặt. Hàng sau thể hiện L/R tương ứng. Phép giải tích này là gần giống nhau cho cả mô hình nam giới chuẩn và mô hình nữ giới chuẩn.

Bảng 3 – Số liệu thu được bằng cách sử dụng mô hình phỏng cầu ở 50 Hz

	Nam giới chuẩn	Nữ giới chuẩn
Chiều cao L, m	1,76	1,63
Khối lượng M, kg	73	60
Diện tích bề mặt tổng của cơ thể SB_T , m ²	1,899	1,662
Diện tích bề mặt cơ thể bị giảm SB_R , m ²	1,557	1,363
Bán kính phỏng cầu R, m	0,178	0,168
L/R	9,86	9,68
Mật độ dòng điện J_{sz} trong phỏng cầu trên mỗi kV/m, mA/m ²	0,134	0,130
Dòng điện chạm đất trên mỗi kV/m, μ A	13,4	11,6

Mật độ dòng điện J_{sz} trong phỏng cầu chỉ phụ thuộc vào tham số L/R, trường điện và tần số. Đối L/R = 9,86 mật độ dòng điện trong toàn bộ phỏng cầu là $J_{sz} = 0,134$ mA/m² trên mỗi kV/m của trường điện ở 50 Hz. Đối với tần số 60 Hz, mật độ dòng điện trong toàn bộ phỏng cầu cao hơn 20 %.

Mật độ dòng điện theo phương thẳng đứng J_{sz} là đồng nhất trong toàn bộ phỏng cầu. Dòng điện theo phương thẳng đứng chạy qua lớp nằm ngang của phỏng cầu vì thế dòng điện này tăng dần từ zero tại điểm cao đến giá trị cực đại ở đất. Điều này là do dòng điện dịch chuyển từ từ vào phỏng cầu qua toàn bộ chiều cao phỏng cầu.

Trong thực tế, cơ thể người không phải là một nửa phỏng cầu mà có bán kính nằm ngang cho hiệu quả thay đổi không đều theo phương thẳng đứng giống như được thể hiện bằng mô hình đối xứng qua trục.

Giả thiết rằng ở một độ cao cụ thể, cùng một dòng điện tổng chạy qua như trong phỏng cầu, nhưng chạy trong diện tích mặt cắt khác nhau của mô hình không đối xứng qua trục ở độ cao đó. Do đó với độ

cao cụ thể h cao hơn mặt đất, mật độ dòng điện cảm ứng trong mô hình đối xứng qua trục J_A được cho bởi:

$$J_A(h) = J_S(h) \times \frac{\text{diện tích nằm ngang của phỏng cầu}}{\text{diện tích nằm ngang của cơ thể}}$$

hoặc

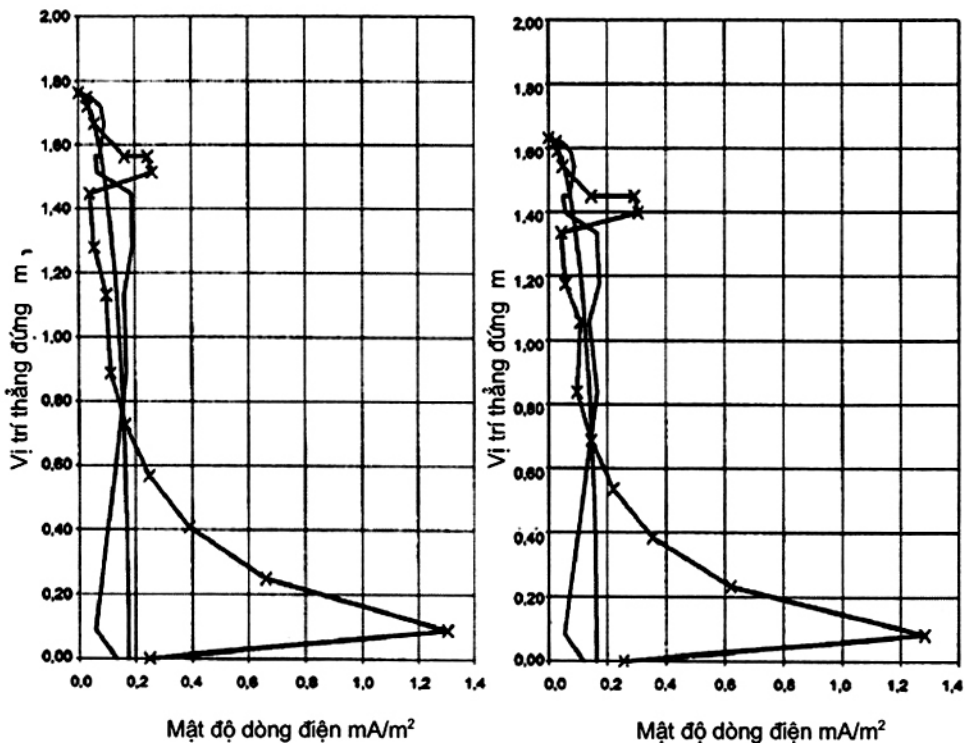
$$J_A(h) = J_S(h) * \frac{r_s^2(h)}{r_A^2(h)}$$

trong đó $r_s(h)$ là bán kính nằm ngang của phỏng cầu ở chiều cao h còn $r_A(h)$ là bán kính nằm ngang của mô hình đối xứng qua trục ở độ cao h.

Mặt cắt thẳng đứng của phỏng cầu qua trục của nó là hình elip và bán kính $r_s(h)$ ở độ cao h của nửa phỏng cầu là:

$$r_s(h) = R \sqrt{1 - (h/L)^2}$$

Sự thay đổi về mật độ dòng điện theo độ cao như thể hiện trong Hình 12 dành cho nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn.



Trên hình thể hiện cả đường bao của mô hình phỏng cầu và mô hình đối xứng qua trục. Bên trái: nam, bên phải: nữ.

Hình 12 – Mật độ dòng điện cảm ứng $J_A(h)$ trong cơ thể người đứng trong trường điện thẳng đứng 1 kV/m ở 50 Hz

Mật độ dòng điện lớn nhất là ở mắt cá chân, còn ở cổ thì mật độ nhỏ hơn. Mật độ dòng điện ở phần thấp nhất của cổ lớn hơn một chút so với phần cao nhất của cổ mặc dù đường kính của phần thấp nhất của cổ là lớn hơn một chút. Bảng 4 đưa ra mật độ dòng điện lớn nhất ở cổ đối với nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn và cũng đưa ra đường kính cổ tương ứng tại điểm lớn nhất.

Đại lượng trọng tâm ở đây là trường điện bên ngoài E_{BR} cần có để tạo ra mật độ dòng điện bằng với giới hạn cơ bản. Đại lượng này có được bằng cách lấy giới hạn cơ bản (J_{BR} tính bằng mA/m²) chia cho mật độ dòng điện trên mỗi kV/m (J_A tính bằng mA/m²/(kV/m)).

$$E_{BR} = \frac{J_{BR}}{J_A(\text{cổ})}$$

Giá trị E_{BR} được nêu đối với hai giới hạn cơ bản J_{RB} được sử dụng phổ biến nhất: 2 mA/m² (công chúng) và 10 mA/m² (nghề nghiệp).

Đây là các tính toán về mật độ dòng điện trung bình ở cổ và giả thiết dòng điện được phân bố đồng đều qua mặt cắt ngang của cổ. Yếu tố dẫn điện không đồng nhất và ảnh hưởng của nó đến mật độ dòng điện trong phần cổ và ở hệ thần kinh trung ương được nêu trong 6.4.

Bảng 4 – Trường điện E_{BR} cần thiết để tạo ra giới hạn cơ bản J_{BR} ở cổ tại 50 Hz

	Nam giới chuẩn	Nữ giới chuẩn
J_A , mật độ dòng điện ở cổ trên mỗi kV/m, mA/m ²	0,244	0,286
Chu vi ở phần thấp nhất của cổ, m	0,425	0,368
E_{BR} , trường điện đối với giới hạn cơ bản ở cổ 2 mA/m ² , kV/m	8,2	7,0
E_{BR} , trường điện đối với giới hạn cơ bản ở cổ 10 mA/m ² , kV/m	41	35

5.3.2 Đánh số

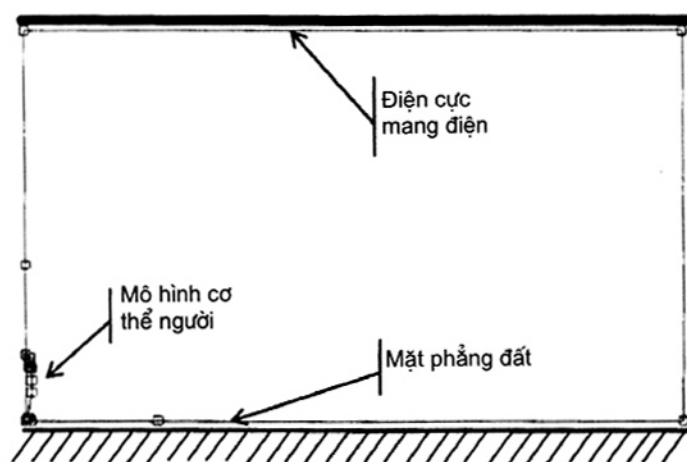
Các phép tính đánh số được thể hiện đối với nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn cho mô hình cơ thể đối xứng qua trục với điều kiện là kiểm tra lại hiệu lực của cách tiếp cận giải tích. Kết quả đánh số đối với trẻ em 10 tuổi chuẩn được đưa ra trong Phụ lục C.

Phạm vi tính toán là giống như phạm vi được sử dụng để tính cho mô hình nửa phỏng cầu (xem 5.2.2 và Hình 13).

Giá trị của các tham số vật lý giống như các giá trị đã sử dụng trước:

- $\epsilon = 1$ và $\sigma = 0$ S/m đối với không khí
- $\epsilon = 10^5$ và $\sigma = 0,2$ S/m đối với cơ thể người

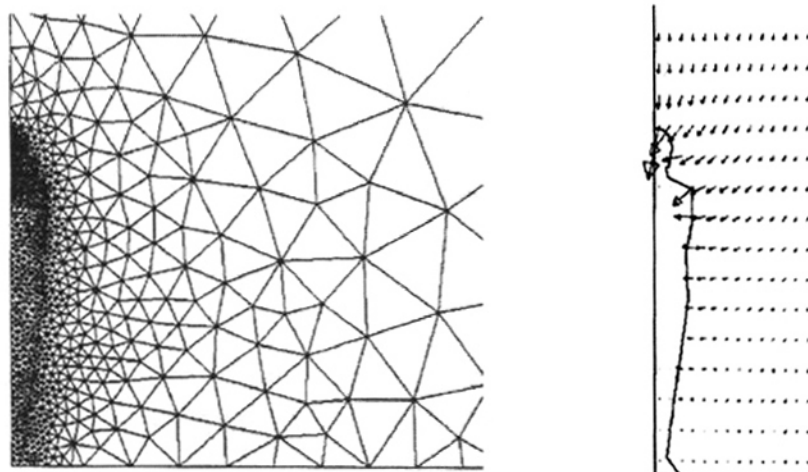
Kích thước của mô hình người đối xứng qua trục được cho trong Bảng B.4. Hình dạng được minh họa trong Hình 6.



Hình 13 – Phạm vi tính toán

Kết quả được cho dưới đây dành cho nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn.

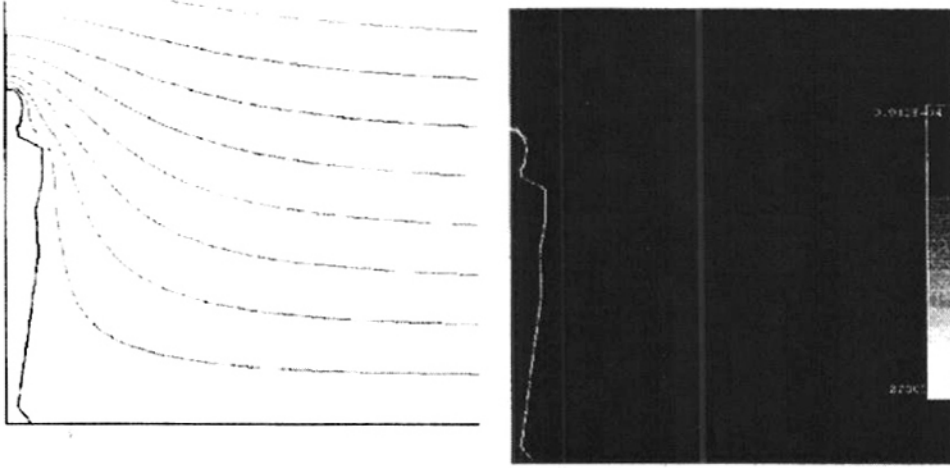
5.3.2.1 Mô hình nam giới chuẩn



Hình 14 – Mật lưới ở mô hình cơ thể nam giới và sự biến dạng đường sức của trường điện tần số công nghiệp gần mô hình

Hình 14 thể hiện trường điện xáo trộn trong không khí, ở gần mô hình. Theo cách trên đây, mô hình cơ thể người làm biến dạng các đường sức của trường điện, làm các đường sức này trở nên vuông góc với bề mặt cơ thể. Nếu không có mô hình cơ thể người hoặc ở cách xa thì các đường sức của trường điện là thẳng đứng.

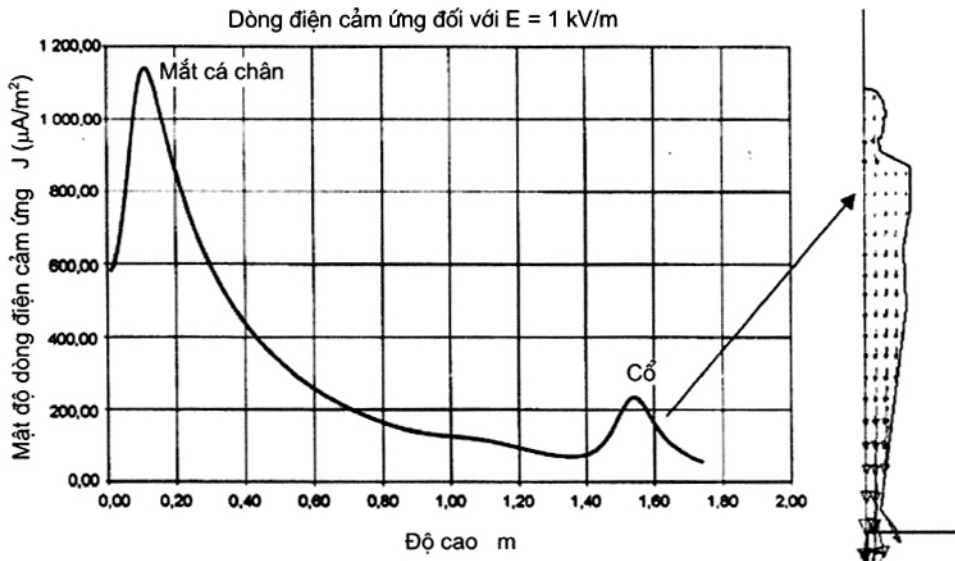
Hình 15 thể hiện sự biến dạng đường sức đẳng thế của trường điện do có mô hình cơ thể người và sự phân bố của cường độ trường điện. Độ biến dạng mạnh nhất là ở sát đầu của mô hình, điều đó cũng có nghĩa là ở vùng đó trường điện là mạnh hơn.



Hình 15 – Phân bố các đường sức điện thế và độ lớn trường điện 50 Hz (mô hình nam giới)

Giá trị lớn nhất của trường điện trong không khí xung quanh đầu là 18 kV/m (khi không có mô hình cơ thể người, giá trị trường điện bên ngoài không xáo trộn $E_0 = 1$ kV/m).

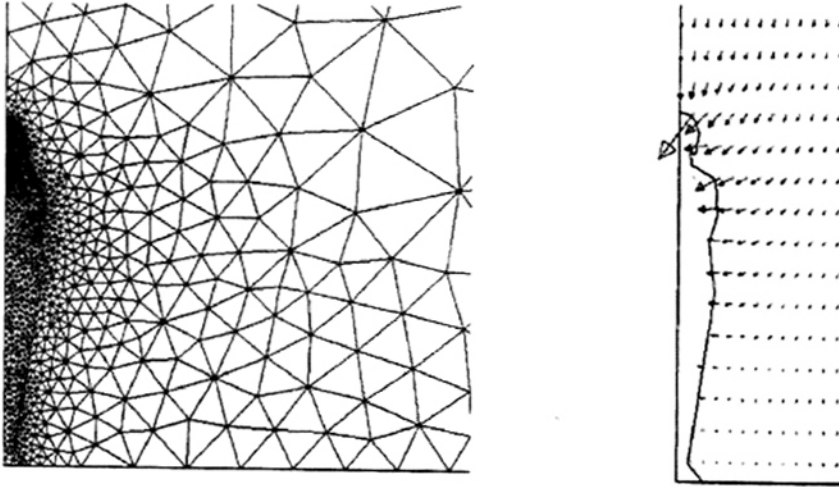
Hình 16 thể hiện kết quả tính toán dòng điện cảm ứng bên trong mô hình cơ thể người. Các giá trị này được tính dọc theo trục xoay của mô hình. Các giá trị này tương đương với trường điện 50 Hz không xáo trộn $E_0 = 1$ kV/m.



Hình 16 – Tính toán dòng điện cảm ứng J_A dọc theo trục thẳng đứng và phân bố dòng điện cảm ứng trong mô hình nam giới tại 50 Hz

Giá trị mật độ dòng điện cảm ứng J_A được tính bằng mA/m^2 . Mật độ dòng điện cảm ứng cao hơn tại nơi mô hình có tiết diện nhỏ (cổ hoặc mắt cá chân).

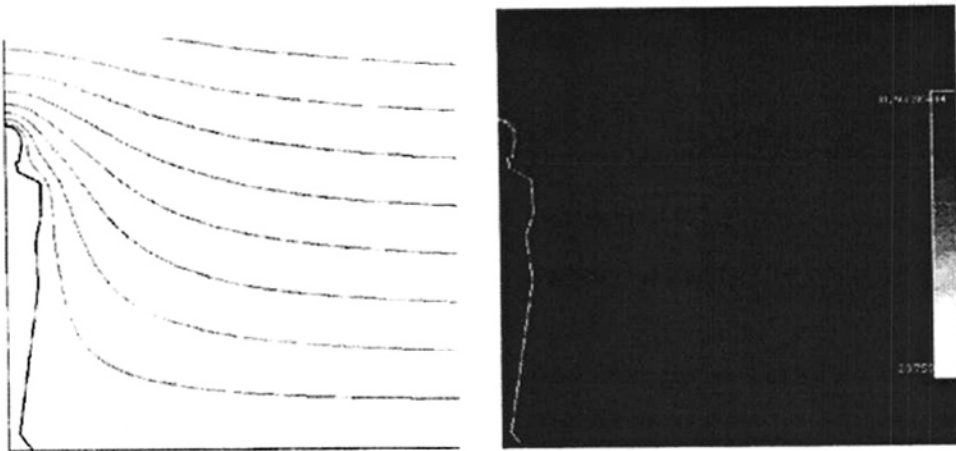
5.3.2.2 Mô hình nữ giới chuẩn



Hình 17 – Mật lưới ở mô hình cơ thể nữ giới và sự biến dạng đường sức của trường điện tần số công nghiệp gần mô hình

Hình 17 thể hiện trường điện xáo trộn trong không khí, ở gần mô hình. Ở cùng cách như trên, mô hình cơ thể người làm biến dạng đường sức trường điện, làm các đường sức trở nên vuông góc với bề mặt cơ thể. Khi không có mô hình cơ thể người hoặc ở cách xa, đường sức của trường điện này là thẳng đứng.

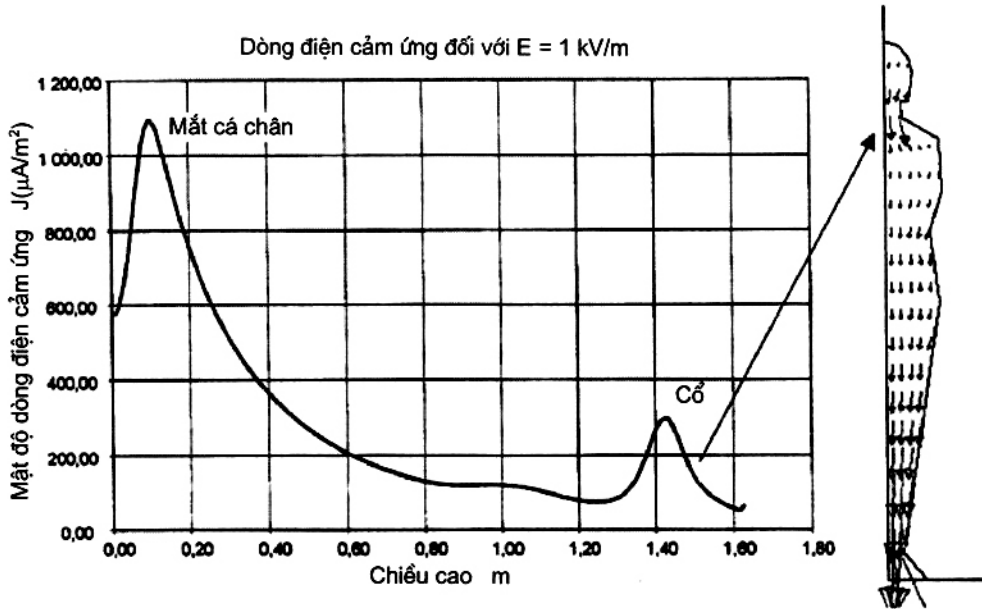
Hình 18 thể hiện độ biến dạng của đường sức đẳng thế trường điện do có mô hình cơ thể người và đưa ra sự phân bố cường độ trường điện. Độ biến dạng lớn nhất là gần vùng đầu của mô hình, điều đó cũng có nghĩa rằng tại vùng đó, trường điện là mạnh hơn.



Hình 18 – Phân bố đường sức điện thế và độ lớn trường điện 50 Hz (mô hình nữ giới)

Giá trị lớn nhất của trường điện trong không khí xung quanh phần đầu là 18 kV/m (khi không có mô hình cơ thể người, giá trị trường điện bên ngoài không xáo trộn $E_0 = 1 \text{ kV/m}$)

Hình 19 thể hiện kết quả tính toán dòng điện cảm ứng bên trong mô hình cơ thể người. Giá trị được tính dọc theo trục xoay của mô hình. Các giá trị này tương đương với trường điện không xáo trộn $E_0 = 1 \text{ kV/m}$.



Hình 19 – Tính toán dòng điện cảm ứng J_A dọc theo trục thẳng đứng và phân bố dòng điện cảm ứng ở mô hình nữ giới tại 50 Hz

Giá trị của mật độ dòng điện cảm ứng J_A được tính bằng mA/m^2 . Mật độ dòng điện cảm ứng cao hơn tại nơi mô hình có tiết diện nhỏ (cổ hoặc mắt cá chân).

5.4 So sánh mô hình giải tích và mô hình đánh số

Với mô hình có hình dạng thực tế được thể hiện trong 4.4 và được triển khai ở Phụ lục B, mật độ dòng điện cao nhất có ở các vùng có tiết diện nhỏ như cổ hoặc mắt cá chân, trong khi với các mô hình nửa phỏng cầu, mật độ dòng điện cảm ứng không thay đổi dọc theo trục thẳng đứng.

Bảng 5 so sánh các kết quả ở cổ đối với mô hình đánh số thực tế và mô hình giải tích cho ba hình dạng người khác nhau (nam giới, nữ giới và trẻ em). Với mục đích so sánh, các giá trị được sử dụng theo ICNIRP cũng đưa vào Bảng 5.

Bảng 5 – So sánh các giá trị hệ số hình dạng đối với trường điện K_E và mật độ dòng điện tương ứng với trường điện 50 Hz không xáo trộn 1 kV/m

	Nam giới chuẩn	Nữ giới chuẩn	Trẻ em chuẩn 10 tuổi	Số liệu ICNIRP *
K_{EZ} qua mô hình giải tích A.s/V.m	$4,88.10^{-9}$	$5,72.10^{-9}$	$5,16.10^{-9}$	8.10^{-9}
K_{EZ} qua mô hình đánh số A.s/V.m	$4,66.10^{-9}$	$5,94.10^{-9}$	$4,98.10^{-9}$	
J_{Amax} qua mô hình giải tích mA/m ²	0,244	0,286	0,258	0,40
J_{Amax} qua mô hình đánh số mA/m ²	0,233	0,297	0,249	
* Hướng dẫn ICNIRP (1998) không đưa ra nhiều thông tin về mô hình được sử dụng để tính các dòng điện cảm ứng bởi trường điện tần số thấp. Để đơn giản hoá, coi mức chuẩn 50 kV/m tương ứng với giới hạn cơ bản 2 mA/m ² ở 50 Hz. Tính giá trị tương ứng cho K_E bằng cách sử dụng công thức 2.				

Có sự thống nhất rất tốt giữa các kết quả theo phương pháp giải tích và phương pháp đánh số của mô hình cơ thể đối xứng qua trục.

Ví dụ, với trường điện là 8 kV/m tại 50 Hz tính được dòng điện cảm ứng trung bình ở cổ của mô hình nam giới chuẩn là 1,84 mA/m² với phương pháp đánh số và bằng 1,95 mA/m² với phương pháp giải tích. Như giải thích trong 6.4, mật độ dòng điện ở dây thần kinh nằm trong cột sống cần thấp hơn.

6 Ảnh hưởng của các tham số điện

6.1 Yêu cầu chung

Điều 6 nghiên cứu ảnh hưởng của các đặc tính điện lên các mô phỏng dựa trên các kết quả tính toán dòng điện cảm ứng. Hai tham số được nghiên cứu là: hằng số điện môi tương đối và độ dẫn.

Sử dụng điều kiện tính toán và phạm vi tính toán giống như điều trước.

6.2 Ảnh hưởng của hằng số điện môi

Một loạt tính toán được thực hiện bằng cách sử dụng độ dẫn điện không thay đổi của hình cầu ($\sigma = 0,2$ S/m), và các giá trị khác nhau của hằng số điện môi tương đối: $\epsilon_r = 100, 10^3, 10^5, 10^7$.

Kết quả chi tiết không được đưa ra, nhưng các kết quả tính toán đã chứng tỏ là kết quả này không phụ thuộc vào giá trị của hằng số điện môi tương đối trong dãy hằng số điện môi này.

6.3 Ảnh hưởng của độ dẫn điện

Một loạt các tính toán được thực hiện bằng cách sử dụng hằng số điện môi tương đối không đổi ($\epsilon_r = 10^5$) và các giá trị khác nhau của độ dẫn điện: $\sigma = 0,1; 0,2; 0,4$ và $0,8$ S/m.

Kết quả tính toán chứng tỏ độ lớn của dòng điện cảm ứng không phụ thuộc vào độ dẫn điện.

Kết luận là mật độ dòng điện cảm ứng chỉ phụ thuộc vào hình dạng của cơ thể người khi các tham số điện đồng nhất trong cơ thể. Tuy nhiên, khi các tham số điện không đồng nhất trong cơ thể, mật độ dòng điện phụ thuộc nhiều vào các thay đổi của tham số điện giữa các bộ phận liên kế.

6.4 Độ dẫn không đồng nhất

Các hướng dẫn ví dụ như hướng dẫn của ICNIRP qui định giới hạn cơ bản về mật độ dòng điện trong hệ thần kinh trung ương hơn là chỉ trong phần cổ. Vì độ dẫn của dây thần kinh nằm trong cột sống thấp hơn so với độ dẫn trung bình ở cổ, mật độ dòng điện ở dây thần kinh nằm trong cột sống thấp hơn mật độ dòng điện trung bình ở cổ. Hiện tại, dữ liệu sẵn có đối với độ dẫn là không đủ chính xác để xác định hệ số suy giảm với độ tin cậy bất kỳ. Nhiều công việc thử nghiệm đang được tiến hành nhằm cung cấp thông tin chính xác hơn về độ dẫn điện và sẽ được công bố ở Phần 4 của bộ tiêu chuẩn này. Sử dụng các dữ liệu trong Phần 4 để khuyến cáo về hệ số suy giảm thích hợp.

7 Phép đo dòng điện cảm ứng bởi trường điện

7.1 Yêu cầu chung

Dòng điện bên trong cơ thể được cảm ứng khi xảy ra phơi nhiễm bộ phận hoặc toàn bộ cơ thể trong trường. Sử dụng các kỹ thuật đo đặc biệt để đánh giá dòng điện cảm ứng. Mức độ phức tạp kết hợp với việc đánh giá cường độ của dòng điện cảm ứng có liên quan đến các tuyến dẫn mà qua đó dòng điện chạy trong cơ thể. Với phơi nhiễm trường điện, dòng điện cảm ứng chạy qua cơ thể hoặc bộ phận của cơ thể, thường đi qua chân và bàn chân tới đất hoặc sàn (bất cứ bề mặt nào có điện thế thấp nhất tiếp xúc với cơ thể). Trong trường hợp này, việc sử dụng các thiết bị đo mà các thiết bị này trong thực tế được đặt nối tiếp với cơ thể và đất, có thể đưa ra biện pháp để đánh giá dòng điện cảm ứng bởi trường điện.

Dòng điện cơ thể thường được lấy là dòng điện cảm ứng kết hợp với phơi nhiễm của cơ thể trong trường tần số radio, nhưng không có bất kỳ tiếp xúc trực tiếp nào với các đối tượng khác ngoài mặt đất mà đối tượng có thể đang đứng. Sử dụng một số kỹ thuật chung để đo dòng điện cơ thể kể cả ampe kim dùng để đo dòng điện đi qua mắt cá chân hoặc bắp chân và đồng hồ đo kiểu để người đứng trên tấm phẳng song song để đo dòng điện chạy xuống đất qua bàn chân.

7.2 Dòng điện chạy xuống đất

Dòng điện chạy xuống đất có thể được tính bằng tích của J_s với diện tích mặt cắt của phông cầu ở mức mặt đất.

$$I_g = J_s \pi R^2$$

Dòng điện này có thể đo được [14, 22, 40, 45].

Dòng điện tương ứng xuống đất trên mỗi kV/m đối với nam giới chuẩn là 13,2 μA và đối với nữ giới chuẩn là 11,4 μA ở 50 Hz.

TCVN 8334-3-1 : 2010

EPRI [25] đưa ra công thức theo kinh nghiệm đối với dòng điện chạy xuống đất của một người có chiều cao h đứng trong trường điện thẳng đứng E .

$$I_g = 2\pi f \epsilon_0 h^2 \tan^2(35,7^\circ) E$$

Công thức này tính ra 14,0 μA trên mỗi kV/m đối với mô hình nam giới chuẩn và 12,0 μA trên mỗi kV/m đối với mô hình nữ giới chuẩn ở 50 Hz. Các giá trị này cao hơn 5 % so với phương pháp độc lập hoàn toàn được mô tả ở trên. Cần có thoả thuận chính xác theo phương pháp của EPRI xảy ra đối với người béo hơn có $L/R = 9,073$.

CHÚ THÍCH: Phương pháp tính toán có tính đến việc tiếp xúc hoàn toàn với đất. Trong điều kiện phơi nhiễm thực tế, trở kháng của vùng tiếp xúc làm giảm mức của mật độ dòng điện cảm ứng trong cơ thể. Giá trị mật độ dòng điện cảm ứng đo được tương đương với trường hợp phơi nhiễm xấu nhất.

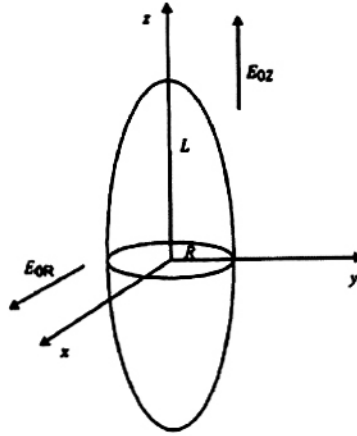
Phụ lục A

(qui định)

Cách giải bằng giải tích đối với phỏng cầu trong trường điện đồng nhất

Phỏng cầu có trục dài là $2L$ nằm trên trục Z , có mặt cắt tròn trong mặt phẳng XY và có bán kính R (Hình A.1). Đặc tính điện từ của phỏng cầu được xác định bởi hằng số điện môi phức $\epsilon_i^* = \epsilon_n \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}$, trong đó ϵ_n và σ lần lượt là hằng số điện môi tương đối và độ dẫn điện của mô sinh học; ϵ_0 là hằng số điện môi trong chân không còn ω là tần số góc của trường điện bên ngoài.

Phỏng cầu được đặt trong trường điện đồng nhất E_0 có phương song song với trục xoay của phỏng cầu (trục Z) hoặc có phương vuông góc với trục Z (tức là song song với trục X hoặc trục Y). Ví thế, chúng được gọi lần lượt là E_{0z} và E_{0R} .



Hình A.1 – Phỏng cầu dẫn điện bị phơi nhiễm trong trường điện

Mật độ dòng điện cảm ứng bên trong phỏng cầu khi trường bên ngoài E_{0z} song song với trục dài và giả thiết rằng $L/R > 1$ (mô hình người), được cho theo [61, 62].

$$J_{sz} = \sigma \left\{ \frac{E_{0z}}{1 + (\epsilon_i^*/\epsilon_c^* - 1)(u_0^2 - 1)[u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]} \right\} \quad (A.1)$$

Mật độ dòng điện trong phỏng cầu có cùng phương với phương của trường bên ngoài và vì thế được gọi là J_{sz} .

Trong công thức (A.1) ϵ_c^* là hằng số điện môi phức của môi chất bên ngoài và

$$u_0 = 1/\sqrt{1 - (R/L)^2}$$

Mật độ dòng điện cảm ứng bên trong phỏng cầu khi trường bên ngoài E_{0R} vuông góc với trục quay, được tính bởi

$$J_{SR} = \sigma \left\{ \frac{E_{0R}}{1 + (\varepsilon_i^* / \varepsilon_c^* - 1) \frac{u_0}{2} [u_0 - (u_0^2 - 1) \coth^{-1}(u_0)]} \right\} \quad (A.2)$$

Mật độ dòng điện trong phỏng cầu này có cùng phương với phương của trường bên ngoài và vì thế được gọi là J_{SR} .

Đối với các tần số lên đến ít nhất là 100 kHz và có thể lên tới 1 MHz hoặc 10 MHz, có thể giả thiết rằng $\varepsilon_n \varepsilon_0 \omega / \sigma \ll 1$ đối với các tham số điện của mô sinh học. Đưa điều này và các đặc tính của không khí xung quanh vào tính toán, có thể viết thành biểu thức sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^* &= \varepsilon_n \varepsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \cong -j \frac{\sigma}{\omega} \\ \varepsilon_c^* &= \varepsilon_0 \end{aligned}$$

sao cho

$$\frac{\varepsilon_i^*}{\varepsilon_c^*} - 1 \cong -j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

Đặt vào các phép tính gần đúng ở trên, công thức (A.1) và (A.2) lần lượt trở thành:

$$\begin{aligned} J_{sz} &= \sigma \left\{ \frac{E_{0z}}{1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} (u_0^2 - 1) [u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]} \right\} \\ &\cong \sigma \left\{ \frac{E_{0z}}{-j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} (u_0^2 - 1) [u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]} \right\} \\ &= j \frac{\omega \varepsilon_0 E_{0z}}{(u_0^2 - 1) [u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]} \\ J_{SR} &= \sigma \left\{ \frac{E_{0R}}{1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \frac{u_0}{2} [u_0 - (u_0^2 - 1) \coth^{-1}(u_0)]} \right\} \end{aligned} \quad (A.3)$$

$$\cong \sigma \left\{ \frac{E_{0R}}{-j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \frac{u_0}{2} [u_0 - (u_0^2 - 1) \coth^{-1}(u_0)]} \right\} \quad (\text{A.4})$$

$$= j \frac{2\omega \epsilon_0 E_{0R}}{u_0 [u_0 - (u_0^2 - 1) \coth^{-1}(u_0)]}$$

Hệ số hình dạng đối với trường điện K_E được tính bằng:

$$K_{EZ} = \frac{2\pi \epsilon_0}{(u_0^2 - 1)[u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]} \quad \text{với } E_{0Z} \text{ song song với trục } Z$$

$$K_{ER} = \frac{4\pi \epsilon_0}{u_0 [u_0 - (u_0^2 - 1) \coth^{-1}(u_0)]} \quad \text{với } E_{0R} \text{ vuông góc với trục } Z$$

Một điều đáng phải lưu ý là hệ số hình dạng dùng cho trường điện K_E chỉ phụ thuộc vào dữ liệu hình học và không phụ thuộc vào các tham số điện và tần số.

K_{EZ} có thể giảm ước bằng cách sử dụng đồng nhất thức

$$\coth^{-1}(u_0) = 0,5 \ln \left(\frac{u_0 + 1}{u_0 - 1} \right) \quad (|u_0| > 1)$$

để có

$$J_{SZ} = \omega \epsilon_0 E_0 \left\{ \frac{1}{(u_0^2 - 1)[u_0 0,5 \ln(u_0 + 1)/(u_0 - 1) - 1]} \right\}$$

Phụ lục B

(qui định)

Mô hình đối xứng qua trục của cơ thể người

B.1 Qui định chung

Điều B.2 mô tả các sử dụng các dữ liệu từ khảo sát nhân trắc, trên một mẫu lớn gồm nam giới và nữ giới để xây dựng mô hình đối xứng qua trục tổng quát. Điều B.3 mô tả tổng quát mô hình đối xứng qua trục được áp dụng để tạo nên mô hình cơ thể đối xứng qua trục cụ thể cho mọi chiều cao hoặc cân nặng của nam giới và nữ giới. Phương pháp này đã được sử dụng để tạo ra các tọa độ đối với nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn đưa ra trong Bảng B.4 và minh họa trên Hình 6.

B.2 Xây dựng mô hình đối xứng qua trục

Khảo sát nhân trắc [56] đưa ra số liệu thống kê liên quan đến 180 phép đo khác nhau trên 2 208 người nữ và 1 774 người nam được chọn làm mẫu đại diện của Quân đội Mỹ vào năm 1988. Số liệu thống kê tổng quát đã thể hiện từng số đo bao gồm nhỏ nhất, lớn nhất, trung bình và 25 phân vị khác nhau. Mô hình được xây dựng bằng cách sử dụng các số đo chủ chốt để đưa ra 13 tọa độ (bán kính, chiều cao) trên bề mặt của mô hình đối xứng qua trục của cơ thể. Các điểm được nối với nhau bằng các đoạn thẳng như thể hiện trên Hình B.1 và quay quanh trục thẳng đứng để thể hiện mô hình đầy đủ.

Về nguyên tắc, các mô hình riêng rẽ được triển khai đối với từng số liệu thống kê. Số liệu thống kê được lựa chọn là nam giới trung bình và nữ giới trung bình. Dữ liệu dùng cho thống kê trung bình và ở giữa hầu như đồng nhất cho tất cả các số đo. Kích thước thẳng đứng và kích thước xuyên tâm của từng mô hình được chia cho chiều cao để tạo ra mô hình chuẩn hoá.

Bảng B.1 đưa ra các số đo theo cuộc khảo sát nhân trắc để tính chiều cao ở mô hình đối xứng qua trục còn Bảng B.2 thể hiện các số đo về chu vi. Các con số trong dấu ngoặc đơn là số đo chuẩn từ khảo sát.

Mô hình thể hiện người đang đứng ở tư thế thẳng đứng, với chân và bàn chân cùng với cánh tay ở tư thế đứng của chúng. Bán kính được chọn là các bán kính của hình tròn có cùng chu vi với đường tròn đo được thể hiện. Ở vùng thân người, bán kính tính cả cánh tay còn đối với vùng chân, bán kính tính theo sự phối hợp cả hai chân. Khảo sát nhân trắc còn đưa ra chu vi các chi riêng rẽ. Mà tỉ lệ của các chi này cần được kết hợp với số đo phần thân thích hợp.

Mô hình có cằm được đưa lên sao cho phần phía trước của xương hàm có cùng chiều cao với phía sau của xương hàm. Mặc dù, thông thường phần cằm phía trước sẽ phải thấp hơn nhưng điều này đã làm mô hình đơn giản hơn.

Các vị trí bổ sung có thể được thêm vào giữa các vị trí cho trước này bằng phép nội suy tuyến tính để cho phép dòng điện có thể được tính ở các vị trí trung gian.

Phương pháp dùng để điều chỉnh kích thước của mô hình chuẩn hoá tương ứng với chiều cao và khối lượng chuẩn theo ICRP được cho trong Phụ lục B.2.

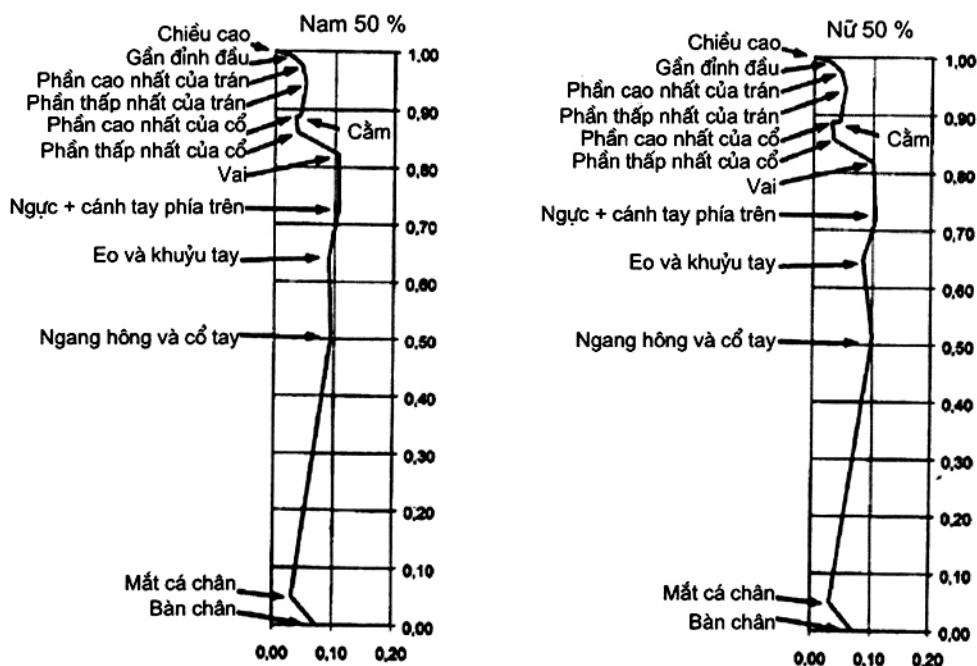
Bảng B.1 – Số đo theo khảo sát nhân trắc được sử dụng để dựng lên kích thước thẳng đứng của mô hình đối xứng qua trục [56]

Vị trí		Chiều cao
1	Đỉnh đầu	Độ cao cơ thể (99)
2	Gần đỉnh đầu	Độ cao cơ thể (99) – $(1-\sqrt{3}/2) \times$ (Đỉnh đầu đến điểm ở trán nằm giữa hai lông mày (tức là phần thấp nhất của trán)) (H19)
3	Phần cao nhất của trán	Độ cao cơ thể (99) – $1/2 \times$ Đỉnh đầu đến điểm ở trán giữa hai lông mày (tức là đến phần thấp nhất của trán) (H19)
4	Phần thấp nhất của trán	Độ cao cơ thể (99) - Đỉnh đầu đến điểm ở trán giữa hai lông mày (tức là đến phần thấp nhất của trán) (H19)
5	Cằm	Độ cao cơ thể (99) - Đỉnh đầu đến điểm góc hàm dưới (tức là đến góc hàm dưới H21)
6	Phần cao nhất của cổ	Độ cao cơ thể (99) - Đỉnh đầu đến điểm góc hàm dưới (tức là góc hàm dưới) (H21)
7	Phần thấp nhất của cổ	Độ cao ở chỗ thấp nhất của cổ ở phía bên (82)
8	Vai	Độ cao của mỏm cùng vai (tức là vai) (2)
9	Ngực + cánh tay phía trên	Độ cao của ngực (37)
10	Eo + khuỷu tay	Độ cao của phần eo (phần lõm) (118)
11	Ngang hông + cổ tay	Độ cao của phần ngang hông (25)
12	Mắt cá chân	$0,05 \times$ Độ cao cơ thể (99)
13	Bàn chân	0
Các con số trong dấu ngoặc đơn là số đo chuẩn từ khảo sát.		

Bảng B.2 – Số đo từ cuộc khảo sát nhân trắc được dùng để dựng lên kích thước xuyên tâm của mô hình đối xứng qua trục [56]

Vị trí (bộ phận)		Chu vi
1	Đỉnh đầu	0
2	Gần đỉnh đầu	$0,5 \times 2\pi \times$ (Đỉnh đầu đến vị trí ở trán nằm giữa hai lông mày) (tức là phần thấp nhất ở trán) (H19)
3	Phần cao nhất của trán	$1-\sqrt{3}/2 \times$ Chu vi của đầu (61)
4	Phần thấp nhất của trán	Chu vi của đầu (61)
5	Cằm	$0,8 \times$ chu vi của đầu (61)
6	Phần cao nhất của cổ	Chu vi cổ (80)
7	Phần thấp nhất của cổ	Chu vi cổ tại phần thấp nhất của cổ (81)
8	Vai	Chu vi vòng tròn vai (90)
9	Ngực + cánh tay phía trên	Chu vi vòng tròn ngực (33) + $0,3 \times 2 \times$ chu vi vòng tròn cánh tay ở nách (tức là phía trên) (7)
10	Eo + khuỷu tay	Chu vi vòng tròn eo ở phần lõm (133) + $0,3 \times 2 \times$ chu vi vòng tròn khuỷu tay (47)
11	Ngang hông + cổ tay	Chu vi vòng tròn hông (23) + $0,2 \times 2 \times$ chu vi cổ tay (126)
12	Mắt cá chân	$0,8 \times 2 \times$ chu vi vòng tròn của mắt cá chân (5)
13	Bàn chân	$0,92 \times 2 \times$ (bề rộng gót chân (64) + bề rộng bàn chân (nằm ngang) (50) + chiều dài bàn chân (51))
<p>Các bán kính được tính bằng cách lấy chu vi vòng tròn chia cho 2π.</p> <p>Các con số trong ngoặc đơn là số đo chuẩn từ khảo sát.</p>		

B.3 Áp dụng vào mô hình cơ thể đối xứng qua trục



Bên trái là mô hình nam giới, bên phải là mô hình nữ giới

Hình B.1 – Mô hình đối xứng qua trục tiêu chuẩn

Hình B.1 minh họa mặt cắt xuyên tâm của mô hình tiêu chuẩn cho nam giới và nữ giới, mô hình này đã được trình bày trong Điều B.2. Mô hình được xác định bởi 13 cặp tọa độ, cho trong bảng B.3. Tất cả các kích thước được thể hiện là các đại lượng không có thứ nguyên vì chia chúng cho chiều cao.

Bảng B.3 – Kích thước mô hình tiêu chuẩn hoá

	Người nam – có kích thước trung bình		Người nữ – có kích thước trung bình	
	Bán kính	Thẳng đứng	Bán kính	Thẳng đứng
Đỉnh đầu	0,000 0	1,000 0	0,000 0	1,000 0
Gần đỉnh đầu	0,027 4	0,992 7	0,027 1	0,992 7
Phần cao nhất của trán	0,044 6	0,972 6	0,046 2	0,972 9
Phần thấp nhất của trán	0,051 5	0,945 2	0,053 4	0,945 9
Cằm	0,042 2	0,887 3	0,043 8	0,888 3
Phần cao nhất của cổ	0,034 3	0,887 3	0,030 8	0,888 3
Phần thấp nhất của cổ	0,037 0	0,859 7	0,033 8	0,857 2
Vai	0,106 5	0,821 6	0,100 0	0,818 3
Ngực + cánh tay phía trên	0,107 7	0,726 3	0,105 1	0,720 3
Eo + khuỷu tay	0,090 7	0,641 6	0,084 1	0,648 5
Ngang hông + cổ tay	0,095 3	0,504 1	0,100 3	0,514 1
Mắt cá chân	0,032 2	0,050 0	0,032 1	0,050 0
Bàn chân	0,073 7	0,000 0	0,071 8	0,000 0
Diện tích bề mặt, SB_N	0,481 6		0,479 0	
Tất cả các số đo được thể hiện là các đại lượng không có thứ nguyên vì chia chúng cho chiều cao.				

Mô hình được tạo dựng từ các kích thước lấy trung bình đối với nam giới và nữ giới theo kết quả khảo sát về nhân trắc. Chênh lệch về kiểu dáng nam giới và nữ giới của mô hình tiêu chuẩn là rất nhỏ và không có khả năng ảnh hưởng đáng kể đến kết quả. Chênh lệch về chiều cao và khối lượng được sử dụng vì điều đó có ảnh hưởng đến các kết quả.

Diện tích bề mặt tiêu chuẩn (bề mặt bên ngoài) SB_N (đơn vị không có thứ nguyên) được cho trong hàng dưới cùng bảng. Diện tích bề mặt tỉ lệ với chiều cao và bán kính mà cả hai giá trị này được tiêu chuẩn hoá bằng cách chia cho chiều cao cơ thể. Do đó, đối với người có chiều cao L và có hình dạng tiêu chuẩn thì diện tích bề mặt là:

$$SB = L^2 SB_N \quad (B-1)$$

Mô hình này có thể sử dụng để đại diện cho người có chiều cao và diện tích bề mặt SB_R bất kỳ. Để làm điều này, trước tiên phải nhân kích thước tiêu chuẩn với chiều cao được qui định L để thu được mô hình đối với người có chiều cao L và diện tích bề mặt $L^2 SB_N$. Sau đó điều chỉnh kích thước bán kính bằng cách sử dụng hệ số $SB_R / (L^2 \times SB_N)$ để tính được bán kính mô hình đối xứng qua trục cuối cùng. Từ đó, để thu được kích thước bán kính cuối cùng, nhân bán kính tiêu chuẩn với $L \times SB_R / (L^2 \times SB_N)$ hoặc $SB_R / (L \times SB_N)$.

ICRP [38] đưa ra dữ liệu thống kê đối với toàn bộ phân bố và đưa ra các giá trị chuẩn về chiều cao, cân nặng và diện tích bề mặt đối với nam giới trưởng thành, nữ giới trưởng thành và trẻ em, lần lượt được cho trong Bảng 1 và C.1. Kích thước của mô hình đối xứng qua trục dùng cho nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn được đưa ra trong bảng B.4.

Bảng B.4 – Kích thước mô hình đối xứng qua trục cho nam giới chuẩn và nữ giới chuẩn có khối lượng và chiều cao được qui định bởi ICRP [38] và được cho trong Bảng 1

	Nam giới chuẩn		Nữ giới chuẩn	
	Bán kính	Thẳng đứng	bán kính	Thẳng đứng
Đỉnh đầu	0,000 0	1,760 0	0,000 0	1,630 0
Gần đỉnh đầu	0,050 1	1,747 1	0,046 9	1,618 2
Phần cao nhất của trán	0,081 5	1,711 8	0,080 2	1,585 9
Phần thấp nhất của trán	0,094 2	1,663 5	0,092 6	1,541 7
Cằm	0,077 2	1,561 6	0,075 9	1,447 9
Phần cao nhất của cổ	0,062 8	1,561 6	0,053 4	1,447 9
Phần thấp nhất của cổ	0,067 6	1,513 0	0,058 6	1,397 2
Vai	0,194 8	1,446 0	0,173 4	1,333 9
Ngực + cánh tay phía trên	0,197 0	1,278 3	0,182 2	1,174 0
Eo + khuỷu tay	0,165 9	1,129 3	0,145 8	1,057 1
Ngang hông + cổ tay	0,174 3	0,887 3	0,173 8	0,838 0
Mắt cá chân	0,058 9	0,088 0	0,055 6	0,081 5
Bàn chân	0,134 9	0,000 0	0,124 4	0,000 0
SB_R		1,557		1,363

Để tạo mô hình đối xứng qua trục cho người nam hoặc người nữ có chiều cao L và khối lượng M:

- * chọn chiều cao cơ thể L tính bằng mét
- * chọn khối lượng cơ thể M tính bằng kg
- * xác định SB_R yêu cầu theo L và M bằng cách sử dụng công thức (3) và (4)
- * chọn người nam hoặc người nữ
- * xác định hàng dọc trong Bảng B.3 để đưa ra các kích thước thẳng đứng tiêu chuẩn và nhân với L để tính kích thước thẳng đứng thực tế
- * xác định hàng dọc trong Bảng B.3 để đưa ra kích thước bán kính tiêu chuẩn cho người nam và người nữ như qui định, rồi nhân các giá trị đó với $SB_N/(SB_N L)$ để tính được kích thước bán kính thực tế cho mô hình đối xứng qua trục, trong đó SB_N được lấy từ hàng cuối cùng của Bảng B.3

Phụ lục C
(tham khảo)
Mô hình cơ thể trẻ em

C.1 Mô hình trẻ em chuẩn

ICRP [38] đưa ra dữ liệu thống kê về phân bố tổng thể và đưa ra các giá trị chuẩn về chiều cao, cân nặng và diện tích bề mặt đối với nam giới trưởng thành, nữ giới trưởng thành và trẻ em. Các giá trị chuẩn dành cho lứa tuổi 5, 10 và 15 được chỉ ra trong Bảng C.1. Kích thước của mô hình trẻ em chuẩn được đưa ra trong Bảng C.2

Bảng C.1 – Các giá trị chuẩn được cung cấp bởi ICRP dành cho bé gái và bé trai

	Bé trai			Bé gái		
	Chiều cao	Cân nặng	Diện tích bề mặt	Chiều cao	Cân nặng	Diện tích bề mặt
	m	kg	m ²	m	kg	m ²
15 tuổi	1,67	56	1,62	1,61	53	1,55
10 tuổi	1,38	32	1,12	1,38	32	1,12
5 tuổi	1,09	19	0,78	1,09	19	0,78

Bảng C.2 – Kích thước của trẻ em chuẩn (tính bằng m, ngoại trừ SB_R tính bằng m²)

	Chuẩn đối với nam 15 tuổi		Chuẩn đối với nữ 15 tuổi		Chuẩn đối với trẻ em 10 tuổi		Chuẩn đối với trẻ em 5 tuổi	
	Bán kính	Phương thẳng đứng	Bán kính	Phương thẳng đứng	Bán kính	Phương thẳng đứng	Bán kính	Phương thẳng đứng
Đỉnh đầu	0,000 0	1,670 0	0,000 0	1,610 0	0,000 0	1,380 0	0,000 0	1,090 0
Gần đỉnh đầu	0,045 3	1,657 7	0,044 5	1,598 3	0,037 9	1,369 9	0,032 9	1,082 0
Phần cao nhất của trán	0,073 7	1,624 2	0,076 1	1,566 4	0,061 6	1,342 2	0,053 5	1,060 1
Phần thấp nhất của trán	0,085 1	1,578 5	0,087 9	1,522 8	0,071 2	1,304 4	0,061 7	1,030 2
Cằm	0,069 8	1,481 8	0,072 0	1,430 1	0,057 4	1,224 5	0,050 6	0,967 1
Phần cao nhất của cổ	0,056 8	1,481 8	0,050 7	1,430 1	0,047 5	1,224 5	0,041 2	0,967 1
Phần thấp nhất của cổ	0,061 1	1,435 6	0,055 6	1,380 1	0,051 1	1,186 3	0,044 3	0,937 0
Vai	0,176 1	1,372 0	0,164 6	1,317 5	0,051 1	1,186 3	0,127 7	0,895 5
Ngực + cánh tay phía trên	0,178 1	1,212 9	0,173 0	1,159 6	0,051 1	1,186 3	0,129 1	0,791 7
Eo + khuỷu tay	0,150 0	1,071 5	0,138 4	1,044 1	0,051 1	1,186 3	0,108 7	0,699 4
Ngang hông + cổ tay	0,157 6	0,841 9	0,165 0	0,827 8	0,051 1	1,186 3	0,114 3	0,549 5
Mắt cá chân	0,053 2	0,083 5	0,052 8	0,080 5	0,044 5	0,069 0	0,038 6	0,054 5
Bàn chân	0,121 9	0,000 0	0,118 1	0,000 0	0,102 0	0,000 0	0,088 4	0,000 0
SB _R	1,329		1,272		0,919		0,636	

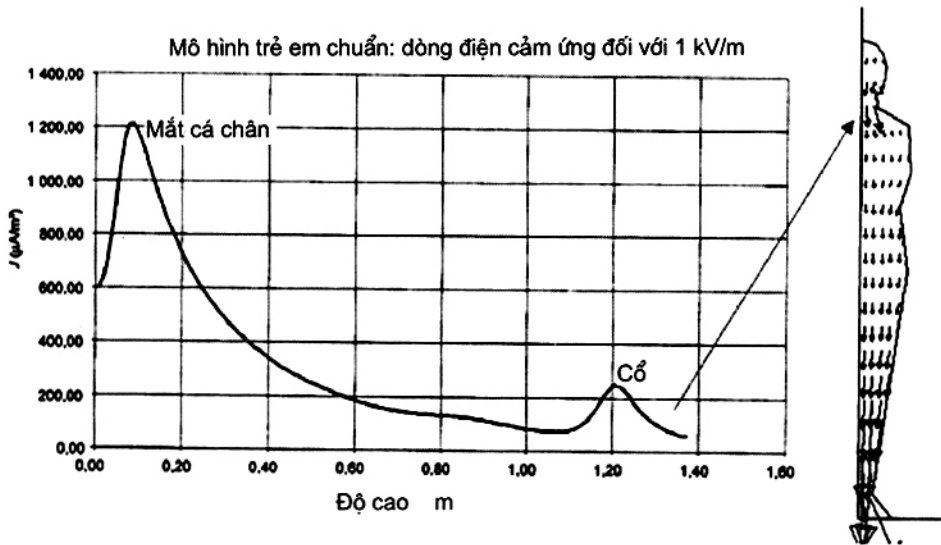
C.2 Kết quả

Kết quả của phương pháp giải tích được đưa ra trong Bảng C.3.

Bảng C.3 – Kết quả của phương pháp giải tích đối với mô hình trẻ em chuẩn

	L	Cân nặng kg	Diện tích bề mặt bị giảm m ²	R phồng cầu m	L/R	J phồng cầu mA/m ²	J ở cổ A/m ²	E đối với 2 mA/m ² kV/m
Bé trai – 15 tuổi	1,670	56	1,329	0,161	10,370	0,1449	0,262	7,62
Bé gái – 15 tuổi	1,610	53	1,272	0,160	10,087	0,1389	0,303	6,59
Bé trai/bé gái – 10 tuổi	1,380	32	0,919	0,135	10,245	0,1422	0,258	7,76
Bé trai/bé gái – 5 tuổi	1,090	19	0,636	0,117	9,292	0,1225	0,224	8,94

Ví dụ về phép tính đánh số được minh họa trên Hình C.2.

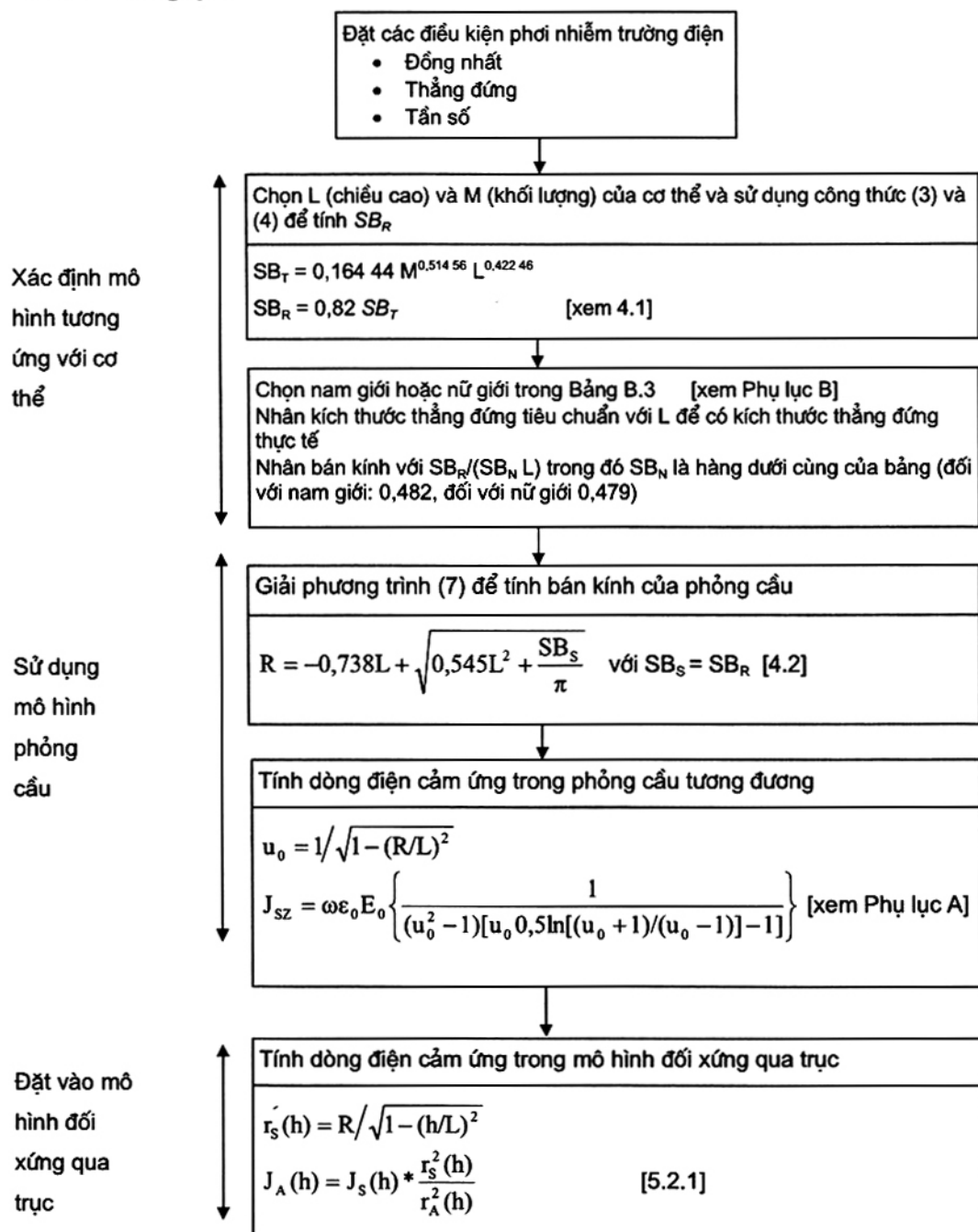


Hình C.1 – Tính toán dòng điện cảm ứng J_z dọc theo trục thẳng đứng và phân bố dòng điện cảm ứng ở mô hình trẻ em 10 tuổi

Giá trị mật độ dòng điện tính được là 0,249 mA/m², giá trị này gần bằng với kết quả của phương pháp giải tích được cho trong Bảng C.3.

Phụ lục D

(tham khảo)

Ví dụ về sử dụng tiêu chuẩn này**D.1 Biểu đồ tổng quát**

D.2 Ví dụ trên một người

Sử dụng phương pháp được minh họa ở đây để tính dòng điện cảm ứng trong một người.

Lựa chọn điều kiện phơi nhiễm: đối với minh họa này, giả thiết tần số $f = 50$ Hz và có trường điện phân cực dọc $E_0 = 3,5$ kV/m.

Chọn kích thước cơ thể: Kích thước cơ thể được đặc trưng bởi chiều cao L và khối lượng M và là cơ thể nam giới hoặc là cơ thể nữ giới. Sao chép lại các giá trị được cho bởi ICRP trong Bảng 1 với nam giới trưởng thành và nữ giới trưởng thành, còn với trẻ em 5 tuổi, 10 tuổi và 15 tuổi cho trong Bảng C.1. Có thể sử dụng phương pháp này cho các cơ thể đó hoặc bất kỳ phối hợp khác về L và M , ví dụ để nghiên cứu sự thay đổi của dòng điện cảm ứng theo khối lượng cơ thể.

Với minh họa này, sử dụng kích thước dành cho nữ giới: $L = 1,55$ m $M = 56$ kg.

Tìm diện tích bề mặt của cơ thể: Tính diện tích bề mặt tổng $SB_T = 0,1644 M^{0,514 56} L^{0,422 46}$ và diện tích bề mặt bị giảm $SB_R = 0,82 SB_T$.

Với minh họa này

$$SB_T = 0,164 4 M^{0,514 56} L^{0,422 46} = 1,570 \text{ m}^2$$

và

$$SB_R = 0,82 \times 1,570 = 1,287 \text{ m}^2.$$

Tìm kích thước của mô hình đối xứng qua trục: theo Bảng B.3 đưa ra kích thước tiêu chuẩn đối với mô hình đối xứng qua trục dành cho nam giới và nữ giới. Chọn các cột dành cho nam giới và nữ giới như đã qui định. Lấy diện tích bề mặt SB_N của mô hình đối xứng qua trục tiêu chuẩn theo hàng cuối cùng của bảng.

Với minh họa này, có:

Bảng D.1 – Kích thước tiêu chuẩn ở mô hình nữ giới

	Nữ giới	
	Hướng kính	Thẳng đứng
Đỉnh đầu	0,000 0	1,000 0
Gần đỉnh đầu	0,027 1	0,992 7
Phần cao nhất của trán	0,046 2	0,972 9
Phần thấp nhất của trán	0,053 4	0,945 9
Cằm	0,043 8	0,888 3
Phần cao nhất của cổ	0,030 8	0,888 3
Phần thấp nhất của cổ	0,033 8	0,857 2
Vai	0,100 0	0,818 3
Ngực + cánh tay phía trên	0,105 1	0,720 3
Eo + khuỷu tay	0,084 1	0,648 5
Ngang hông + cổ tay	0,100 3	0,514 1
Mắt cá chân	0,032 1	0,050 0
Bàn chân	0,071 8	0,000 0
SB _N		0,479 0

Nhân tọa độ thẳng đứng của mô hình tiêu chuẩn với $L = 1,55$ và nhân tọa độ hướng kính của mô hình tiêu chuẩn với $SB_N / (L * SB_N) = 1,287 / (1,55 * 0,4790) = 1,734$.

Bảng D.2 – Tính kích thước đối với một người cụ thể

	Mô hình tiêu chuẩn		Đối với người được chọn	
	Hướng kính	Thẳng đứng	Hướng kính	Thẳng đứng
Đỉnh đầu	0,0000	1,0000	0,0000	1,5500
Gần đỉnh đầu	0,0271	0,9927	0,0470	1,5387
Phần cao nhất của trán	0,0462	0,9729	0,0801	1,5080
Phần thấp nhất của trán	0,0534	0,9459	0,0926	1,4661
Cằm	0,0438	0,8883	0,0759	1,3769
Phần cao nhất của cổ	0,0308	0,8883	0,0534	1,3769
Phần thấp nhất của cổ	0,0338	0,8572	0,0586	1,3287
Vai	0,1000	0,8183	0,1734	1,2684
Ngực + cánh tay phía trên	0,1051	0,7203	0,1822	1,1165
Eo + khuỷu tay	0,0841	0,6485	0,1458	1,0052
Ngang hông + cổ tay	0,1003	0,5141	0,1739	0,7969
Mắt cá chân	0,0321	0,0500	0,0557	0,0775
Bàn chân	0,0718	0,0000	0,1245	0,0000

Nếu lấy mô hình nam giới chuẩn làm ví dụ thì chú ý rằng có sự khác biệt nhỏ giữa các bán kính được thể hiện ở đây so với các giá trị trong bảng B.4, do sai số làm tròn và do rút gọn (trong trường hợp này là 0,4 %) đặt vào các bán kính được sử dụng trong Bảng B.4 để đưa ra diện tích bề mặt thực tế của mô hình đối xứng qua trục chính xác hơn, phù hợp với diện tích bề mặt SB_R được qui định. Tuy nhiên, không coi việc điều chỉnh này là cần thiết và coi như một phần của phương pháp.

Tìm kích thước của mô hình phỏng cầu:

Chiều dài nửa trục dài của phỏng cầu là L . Đối với minh họa này, chiều dài là 1,55.

Tính bán kính R của phỏng cầu từ công thức:

$$R = -0,738L + \sqrt{0,545L^2 + \frac{SB_R}{\pi}}$$

Để minh họa lấy, $R = 0,1673$ m.

Tìm mật độ dòng điện đồng nhất trong phỏng cầu:

Để tính mật độ dòng điện trong phỏng cầu, trước tiên tính u_0 bằng cách sử dụng:

$$u_0 = 1/\sqrt{1-(R/L)^2}$$

Để minh họa lấy $u_0 = 1,0059$

$$J_{sz} = \omega \varepsilon_0 E_0 \left\{ \frac{1}{(u_0^2 - 1)[u_0 \sqrt{0,5 \ln[u_0 + 1]/(u_0 - 1)} - 1]} \right\}$$

Trong đó $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$

và $\omega = 2\pi f$.

Đối với minh họa này $2\pi f = 314,2 \text{ s}^{-1}$ và $J_{sz} = 0,427 \text{ mA/m}^2$.

Tìm mật độ dòng điện ở phần cổ của mô hình đối xứng qua trục:

Có thể tìm được mật độ dòng điện ở toàn bộ mô hình đối xứng qua trục, cho từng cặp tọa độ bán kính-chiều cao. Đối với minh họa này, mật độ dòng điện được đánh giá cho phần cổ mà tại đó mật độ dòng điện là lớn nhất ngoại trừ phần mắt cá chân.

Để minh họa, lấy bán kính ở phần cổ là $r_A = 0,0586$ m ở chiều cao $h = 1,3287$ m.

Trước tiên tính bán kính của phỏng cầu, r_s ở độ cao h , theo:

$$r_s = R \sqrt{1 - \left(\frac{h}{L}\right)^2}$$

Đối với minh họa này $r_s = 0,0861$ m

TCVN 8334-3-1 : 2010

Sau đó tính mật độ dòng điện trong mô hình đối xứng qua trục J_A , ở chiều cao h được chọn bằng cách sử dụng:

$$J_A(h) = J_S \frac{r_S^2(h)}{r_A^2(h)}$$

Đối với minh họa này, mật độ dòng điện trong mô hình đối xứng qua trục $J_A = 0,923 \text{ mA/m}^2$.

Tính trường điện tương ứng với mật độ dòng được chọn:

Trường điện E_{BR} tương ứng mật độ dòng điện giới hạn cơ bản J_{BR} , ví dụ, cho $J_{BR} = 2 \text{ mA/m}^2$ có thể tìm được trường điện E_{BR} bằng cách sử dụng:

$$E_{BR} = J_{BR}/J_{A1(cđ)}$$

trong đó, $J_{A1(cđ)}$ là mật độ dòng điện trong phần cổ của mô hình đối xứng qua trục với trường điện là 1 kV/m .

Để minh họa, lấy $J_{A1(cđ)}$ là $0,923/3,5 = 0,264 \text{ mA/m}^2$ cho mỗi kV/m và $E_{BR} = 7,6 \text{ kV/m}$.

Phụ lục E
(tham khảo)
Phương pháp tính đánh số

E.1 Qui định chung

Có thể sử dụng các phương pháp tính khác nhau để xác định dòng điện cảm ứng trong cơ thể người bằng trường điện bên ngoài E_0 . Một số phương pháp dựa trên mô hình cơ thể (phồng cầu, điện thế không gian) các phương pháp khác sử dụng theo phương pháp hình học thực tế hơn (FEM, FDTD).

Phụ lục này đưa ra quan điểm về các phương pháp tính toán khác nhau. Thông tin được đưa ra trong phụ lục này không đủ để áp dụng chúng, mà phải dựa vào các nguồn tài liệu liên quan.

Tất cả các phương pháp này đều dựa trên cách giải phương trình Maxwell vĩ mô. Việc chọn phương pháp chính xác để giải phương trình dựa trên các tiêu chí khác nhau kể cả tiêu chí về thời gian tính toán.

E.2 Mô hình phồng cầu [46]

Trong mô hình này, cơ thể người được coi là một phồng cầu có kích thước giống với cơ thể người. Sử dụng tính toán này để đánh giá công thức giải tích của mật độ dòng điện cảm ứng trong cơ thể người có tính đến các đặc tính hình học của phồng cầu và giá trị trường điện bên ngoài E_0 .

Phép tính giải tích (xem Phụ lục A) dành cho trường điện song song với trục dài (trục Z)

$$J = K_E \cdot f \cdot E_0$$

trong đó

f là tần số của nguồn

K_E là hệ số hình dạng của trường điện

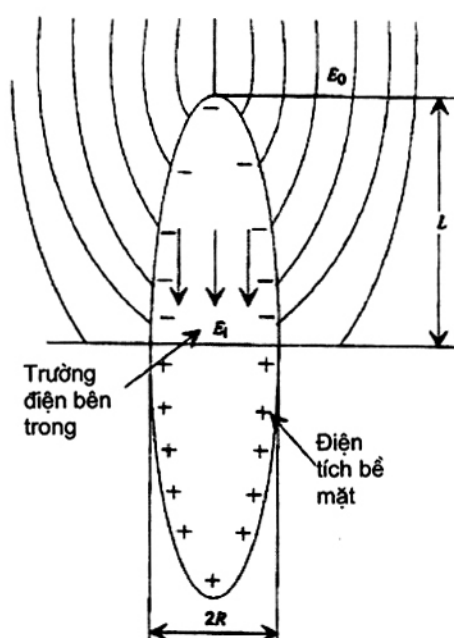
$$K_E = \frac{2\pi\epsilon_0}{(u_0^2 - 1)[u_0 \coth^{-1}(u_0) - 1]}$$

trong đó

$$u_0 = 1/\sqrt{1 - (R/L)^2}$$

R là bán kính của nửa phồng cầu;

L là chiều cao của nửa phồng cầu.



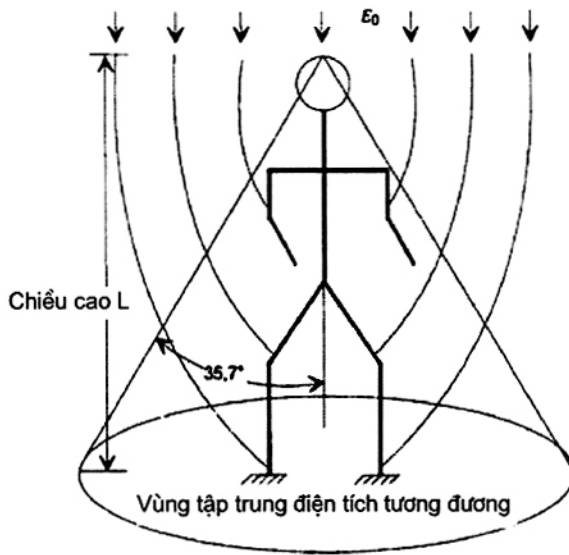
Hình E.1 – Mô hình phỏng cầu

E.3 Phương pháp điện thế không gian [22]

Trong phương pháp này (xem Hình E.2):

- xác định điện dung tương đương ở phần đầu của cơ thể người (tương đương với phỏng cầu)
- tính được điện thế ở phần đầu của cơ thể người: $V = h \times E_0$
- tính được dòng điện tới từ đầu của cơ thể người: $I = \omega \times C \times V$

Phương pháp này dễ sử dụng nhưng rất thiếu chính xác và không được sử dụng thường xuyên.



Hình E.2 – Mô hình điện thế không gian

E.4 Phương pháp mô phỏng điện tích [14, 1, 55, 59, 40]

Nguyên tắc của phương pháp mô phỏng điện tích (CSM) là để mô phỏng trường điện thực tế với trường được tạo bởi số lượng hữu hạn các điện tích ảo bên trong cơ thể. Các giá trị của điện tích mô phỏng được xác định bằng cách đáp ứng điều kiện biên ở một số điểm trong số các điểm đường viền được lựa chọn tại bề mặt cơ thể ($V \approx 0$ khi đặt trường bên ngoài E_0). Khi xác định được các giá trị điện tích mô phỏng thì có thể tính được điện thế và trường điện E của tất cả các điểm ở vùng bên ngoài cơ thể (không khí) bằng cách sử dụng nguyên lý xếp chồng.

Phép tính dòng điện cảm ứng được dựa trên định luật Coulomb, nêu rõ:

$$Q = \epsilon_0 \cdot \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

trong đó S là bề mặt cơ thể.

Trường điện vuông góc với bề mặt của cơ thể và khi có điện áp xoay chiều, công thức trên có thể được biểu thị thành:

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 \cdot \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Dòng điện cảm ứng trên tiết diện S_z ở trục Z thẳng đứng bên trong cơ thể người được suy ra bởi:

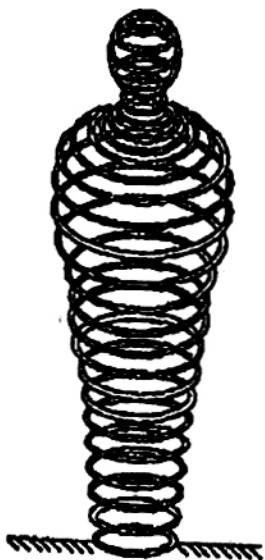
$$J = \frac{I}{S_z}$$

TCVN 8334-3-1 : 2010

Phương pháp này được sử dụng với nhiều loại điện tích: điện tích điểm, điện tích đường, điện tích vòng tròn...

Cách giải ma trận là tương đối đơn giản và phương pháp này thường được sử dụng.

Trong trường hợp của tiêu chuẩn này, cơ thể người phải đồng nhất. Nếu không, không thể sử dụng phương pháp này được.



Hình E.3 - Ví dụ về phương pháp mô phỏng điện tích bằng cách sử dụng các vòng tròn

E.5 Phương pháp phương trình tích phân điện tích ở bề mặt [9, 5, 10]

Sự phân bố điện tích cảm ứng trong cơ thể do có trường điện bên ngoài được xác định bằng phương pháp này và giải phương trình $\text{div}(\vec{J}) = 0$ bên trong cơ thể để xác định sự phân bố lại mật độ dòng điện cảm ứng (xem Hình E.4).

Phương pháp luận như sau:

- Tính phân bố điện tích trên bề mặt của cơ thể.

Bề mặt cơ thể được chia thành n phần nhỏ. Trên mỗi phần xuất hiện mật độ điện tích bề mặt $\rho_s(i)$. Tại một điểm trong không gian, điện thế là tổng hợp của điện thế V_0 được tạo bởi trường điện bên ngoài E_0 và điện thế được tạo bởi điện tích bề mặt V_c .

Giá trị điện thế do phân bố điện tích là:

$$V_c(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho_s(i)}{|r_p - r_i|} d_{s_i}$$

Giả thiết là điện thế trên cơ thể không thay đổi và có thể đưa vào hệ ma trận sau: $[M] \times [\rho_s] + [V_0] = [V_{\text{cơ thể}}]$, với:

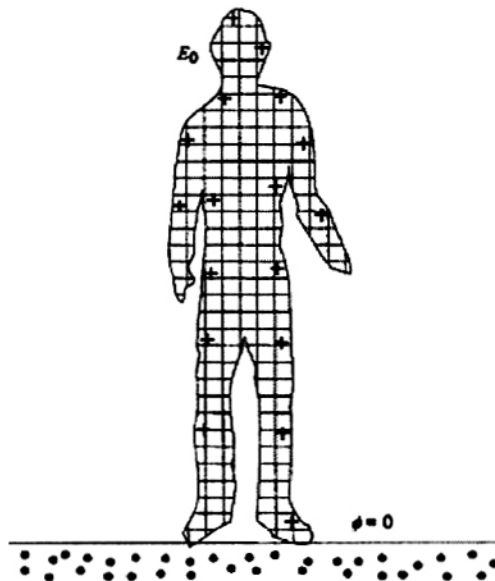
$$M_{i,j} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \left[\int_{S_j} \frac{\rho_s(j)}{|r_i - r_j|} ds_j - \int_{S_j'} \frac{\rho_s(j)}{|r_i - r_j'|} ds_j' \right]$$

Ma trận của mật độ điện tích có được do tương quan giữa dòng điện chạy qua cơ thể và mật độ điện tích:

$$I = j\omega \int \rho_s(j).ds_j = j\omega \sum_{j=1}^N \rho_s(j).ds_j$$

- Tính trường điện tại bề mặt của cơ thể bằng cách sử dụng hệ thức: $E_s = \frac{\rho_s}{\epsilon_0}$.
- Tính dòng điện tuần hoàn trong cơ thể bằng cách sử dụng hệ thức: $I = j\omega \int \rho_s.ds$.
- Tính thành phần vuông góc của mật độ dòng điện bằng cách sử dụng hệ thức: $J_n = \frac{I}{S_x}$.
- Tính thành phần tiếp tuyến của mật độ dòng điện bằng cách sử dụng hệ thức: $\text{div}(\vec{J}) = 0$.
- Tính trường điện bên trong bằng cách sử dụng hệ thức Ohm $E = \frac{\vec{J}}{\sigma}$

Với phương pháp này, mật độ điện tích mặt được tính chính xác nhưng phép tính mật độ dòng điện cảm ứng là gần đúng do giả thuyết về độ đồng nhất của các tham số vật lý bên trong cơ thể người.



Hình E.4 – Phương pháp phương trình tích phân điện tích bề mặt, chia cơ thể thành N phần

E.6 Phương pháp phần tử hữu hạn [10, 12, 13, 26]

Trong phương pháp này, giải phương trình bằng cách sử dụng các phần tử hữu hạn.

Phương trình có:

$$- \operatorname{div}(\sigma \cdot \operatorname{grad}(\phi)) + \frac{d}{dt}(\epsilon \cdot \operatorname{grad}(\phi)) = 0 \quad \text{với } \phi = \text{điện thế}$$

$$- \operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \vec{E} + j\omega \epsilon_r \cdot \vec{E}\right) = 0$$

Phương trình này là nhờ tính bảo toàn dòng điện và có thể được viết thành:

$$(\sigma + j \omega \epsilon_0 \epsilon_r) \cdot \nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Phương trình Laplace})$$

Xác định trường điện trong không gian và tính mật độ dòng điện cảm ứng trong cơ thể bằng cách sử dụng công thức:

$$J = \sigma \cdot E$$

Để tính toán, điều quan trọng là tất cả khoảng không phải được chia thành các mắt lưới bao gồm cả không khí và thời gian tính toán là quan trọng.



Hình E.5 – Mắt lưới của cơ thể theo phương pháp phần tử hữu hạn

E.7 Phương pháp trở kháng [11]

Trong phương pháp này, sự phân bố dòng điện cảm ứng bên trong cơ thể được xác định bằng cách giả thiết rằng cơ thể tương đương với mạng trở kháng. Phương pháp luận:

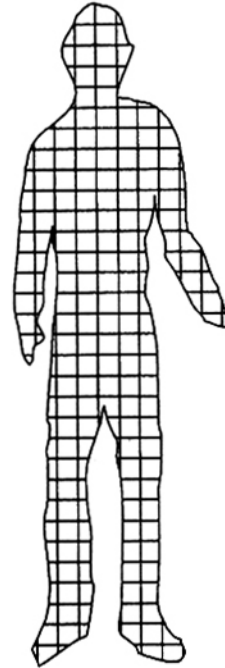
- phân chia cơ thể người thành các phần tử dạng đường kẻ caro;
- tính trở kháng tương đương ở từng phần tử

$$R_m^{i,j,k} = \frac{\Delta_m}{\Delta_i \cdot \Delta_j \cdot \sigma_m^{i,j,k}}$$

trong đó i, j và k là lũy thừa các phần tử được tính đến, m số lần tính, $\sigma_m^{i,j,k}$ là độ dẫn của phần tử còn Δ_i là kích thước của phần tử theo phương i ;

- xác định trường điện bên ngoài bằng cách giải phương trình Laplace với điều kiện đẳng thế tại bề mặt cơ thể;
- tính phân bố dòng điện trong mô hình trở kháng với điều kiện riêng trên cơ thể (dòng điện đưa vào):

$$I = \epsilon_0 \cdot \frac{dE_{\text{ext}}}{dt} dS$$



Hình E.6 – Phương pháp trở kháng

E.8 Phương pháp lai ghép [50]

Phương pháp này cần hai phép tính liên tiếp. Ở phép tính đầu tiên, xác định trường bên ngoài tại bề mặt cơ thể bằng cách giải phương trình Laplace và giả sử bề mặt cơ thể là bề mặt đẳng thế. Từ đó có được phân bố mật độ điện tích bề mặt bằng công thức:

$$\vec{n} \cdot \vec{E}_{\text{ext}} = \frac{\rho_s}{\epsilon_0}$$

Ở phép tính thứ hai, xác định trường bên trong và phân bố điện thế trong mô hình cơ thể người. Mô hình cơ thể người này bao gồm rất nhiều khối nhỏ có kích thước một vài milimét.

Giải phương trình bằng cách sử dụng phương pháp vi sai hữu hạn trên điện thế vô hướng (SPFD) theo hệ thức sau:

- $\vec{E}_{\text{int}} = -j \cdot \omega \cdot \nabla \cdot \Psi$ với Ψ : điện thế bên trong;
- $\nabla \cdot [\sigma \cdot \nabla \cdot \Psi] = 0$ trong cơ thể;

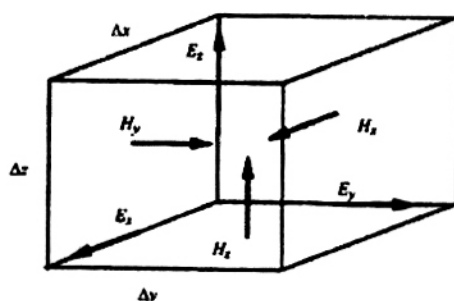
– $\sigma \cdot \vec{n} \cdot \nabla \cdot \Psi = -\rho_s$ ở bề mặt.

Sử dụng phương pháp này thu được kết quả chính xác. Thời gian tính toán là quan trọng vì phải phân chia cơ thể thành các khối nhỏ.

E.9 FDTD [58, 53, 54]

Phương pháp miền thời gian vi sai hữu hạn (FDTD) được cho là phương pháp đánh số phổ biến nhất đối với việc giải quyết các vấn đề về điện từ ở dải tần số cao. Mặc dù phương pháp FDTD đã tồn tại hơn 30 năm nay, nhưng tính phổ biến của nó vẫn tiếp tục phát triển đồng thời các chi phí tính toán liên tục suy giảm.

Phương pháp FDTD là phương pháp đơn giản và khéo léo để rời rạc hoá các dạng vi phân của phương trình Maxwell, lần đầu tiên được đề xuất bởi Yee vào năm 1966. Yee đã sử dụng mạng lưới trường điện E, được dịch chuyển cả không gian và thời gian theo mạng lưới trường từ H để thu được các phương trình mới nhất mà sinh ra các trường hiện có trong toàn bộ miền tính toán dưới dạng trường đã xảy ra trước đó.



Hình E.7 – Phương pháp Yee: Mạng lưới điện và từ để rời rạc hoá không gian

Sử dụng các phương trình mới nhất trong sơ đồ nhảy bậc để tăng từng bước trường E và H theo thời gian. Mặc dù thuật toán của Yee đơn giản và khéo léo nhưng sau khi công bố, nó không được quan tâm nhiều ngay lập tức. Người ta đã cho rằng sự thiếu quan tâm ở thời điểm đó là do chi phí tính toán cao cũng như một số hạn chế vốn có từ xuất bản ban đầu (như không thể lập mô hình vấn đề “mở” cho bất kỳ khoảng thời gian đáng kể nào). Tuy nhiên, do các thiếu sót của việc thực hiện FDTD ban đầu đã được giảm bớt và chi phí tính toán đã giảm nên sự quan tâm đến phương pháp FDTD được tăng lên. Thuật toán FDTD của Yee ban đầu là thuật toán cấp hai chính xác trong cả không gian và thời gian. Các sai số phân tán số và sai số đẳng hướng trong lưới có thể được giữ nhỏ bằng cách có đủ số lượng không gian lưới trên một bước sóng. Taflov là một trong số những người đầu tiên phân tích tỉ mỉ các sai số này [53, 54].

Thư mục tài liệu tham khảo

- [1] Ala, Buccheri, Inzerillo, Shielding effects of buildings on HV electric field human exposure, COMPEL, vol. 19 n° 2 p. 683, 2000
- [2] Ala, Buccheri, Inzerillo, A method to evaluate electric fields induction of overhead lines and substation's equipment in humans, International Symposium on Electromagnetic Cmpatibility EMC'99, 1999, Tokyo, Japan.
- [3] P.Baraton, B. Hutzler: Magnetically induced currents in the human body, IEC Technology Trend Assessment, 1995.
- [4] Bossavit, Mathematical modelling of the problem of micro-currents generated in living bodies by power lines, Int. Journal of applied Electromagnetics in Materials, no 4 p.291-299, 1994.
- [5] Bottauscio, Conti, Magnetically and electrically induced currents in human body models by ELF electromagnetic fields, 10e ISH, p.5-8, 1997
- [6] Bottauscio, Crotti, A numerical method for the evaluation of induced currents in human models by electromagnetic fields, 3rd Workshop on Electric and Magnetic fields – Liège, 1996
- [7] E.L Carstensen, Biological effects of transmission line fields, ELSEVIER, 1987
- [8] CENELEC, Human exposure to low frequency (0 to 10 kHz) electromagnetic fields. ENV 50166-1, 1995
- [9] Chen, Chuang, Lin, Quantification for Interaction between ELF-LF Electric Fields and Human Bodies, IEEE Biomedical Engineering, vol. 33, no 8, p.746, 1986.
- [10] Chen, Lin, Biological effects of electromagnetic fields, Bioelectromagnetism, Oxford Press, p. 903-916, 1995.
- [11] J. Cheng, M.A. Stuchly, C. DeWagter, L. Marten, Magnetic field induced currents in s human head from use of protable appliances, Phys. Med. Biol., 40, 4955-510, 1995.
- [12] Chiba, Isaka, Kitagawa, Application of FEM to analysis of induce current densities inside human model exposed to 60 Hz electric field, IEEE PAS, vol. 103, no 7, p.1895-1901, 1984.
- [13] Chiba, Isaka, Density distribution of currents induced inside the brain in the head part of the human model exposed to power frequency electric field, IEE High Voltage Engineering Symposium, 1.307.P6, 1999.
- [14] CIGRE, Electric and Magnetic Fields Produced by Transmission Systems, Description of Phenomena – Practical Guide for Calculation, CIGRE Guide 21, 1980.
- [15] CIGRE Group 36, Twenty years of research on health effects of 50/60 Hz electromagnetic fields: an assessment, CIGRE, 2000.

- [16] Council of the European union, Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 to 300 GHz), 1999/519/EC.
- [17] Dan Bracken, Experimental macroscopic dosimetry for extremely low frequency electric and magnetic fields, Wiley-Liss, Bioelectromagnetics supplement 1, 15-26, 1992.
- [18] T.W. Dawson, K. Caputa, M.A. Stuchly, Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60-Hz magnetic fields, Bioelectromagnetics, 18, 478-490, 1997.
- [19] T.W. Dawson, K. Caputa, M.A. Stuchly, A comparison of 60 Hz uniform magnetic and electric induction in the human body, Phys. Med. Biol., 42, 2319-2319, 1997.
- [20] T.W. Dawson, K. Caputa, M.A. Stuchly, High-resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency electric fields, IEEE Trans Power Delivery, vol. 13, no.2, pp.366-373, 1998.
- [21] T.W. Dawson, M.A. Stuchly, High-resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency electric fields, IEEE Trans. Magnetic, 34, 3, 1998.
- [22] Deno, Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field – Measurement and calculation of bistribution and dose, IEEE PAS, vol. 96, no 5, p.1517, 1977.
- [23] P/J. Dimbylow, Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body, Phys. Med. Biol., 43, 221-230, 1998.
- [24] P.J. Dimbylow, Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields, Phys. Med. Biol., vol 50 no6, 1047-1070, 2005.
- [25] EPRI, Transmission line reference book 345 kV and above, Electric Power Research Institute. Second edition, 1987.
- [26] EPRI, Transmission line reference book 5 kV and above, EPRI Electric Research Council.
- [27] Foster, Schwan, Dielectric Porperties of tissues and biological material: a critical reviews, CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering, 17:25-104, 1989.
- [28] C.M. Furse, O.P. Gandhi, Calculation of electric fields and currents induced in a millimeter resolution human model at 60 Hz using the FDTD Method. Bioelectromagnetics, 19, 293-299, 1998.
- [29] C.Gabriel, S. Gabtiel and E. Corthout, The dielectric properties of the biological tissues: I. Literature survey, Phys. Med. Biol., vol41 no 11, 2231-2249, 1996.
- [30] S. Gabriel, R. lau, C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, Phys. Med. Biol., 41:2251-2269, 1996.
- [31] S.Gabriel, R.W. Law, C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for dielectric spectrum of tissues, Phys. Med. Biol., 41, 2271-2293, 1996.

- [32] O.P. Gandhi, J.Y. Chen, Numerical dosimetry at power-line frequencies using anatomically based models, *Bioelectromagnetics Supplement 1*, 43-60, 1992.
- [33] Geddes, Baker, The specific resistance of biological materials-a compendium of data the biomedical engineer and physiologist, *Med. Biol. Eng.*, 5:271-291, 1967.
- [34] R.A. Hart. O.P. Gandhi, Comparison of cardiac-induced endogenous fields and power frequency induced exogenous fields in an anatomical model of the human body, *Phys. Med. Biol.*, 43, 3083-3099, 1998.
- [35] A. Hirata, K. Caputa, T.W. Dawson, M.A. Stuchly, Dosimetry in models of child and adult for low-frequency electric field, *IEEE Trans Biomedical Engineering*, vol. 48, no.9, pp. 1007-1012, 2001.
- [36] Horvath, The electric and magnetic field exposition of biological object due to high voltage values, 9^o ISH, p 8349, 1995.
- [37] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *ICNIRP Guidelines*, 1998.
- [38] ICRP, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values, *ICRP Publication 2002*, Pergamon.
- [39] R. Kavet, M.A. Stuchly, W.H. Bailey, T.D. Bracken , Evaluation of biological effects, dosimetric models, and exposure assessment related to ELF electric and magnetic field guidelines, *Appl Occup Environ Hyg* 16:1118-1138, 2001.
- [40] Madhy, Anis, Radwan, Assessment of field exposed humans near EHV Power lines erected in desert, 7^e ISH, p. 67-70, 1991.
- [41] Matsumoto, Chiba, Hayashi, Isaka, Effect of concurrent ELF Electric and Magnetic Fields on induced current density in Biological model in the vicinity of the ground, *IEE High Voltage Engineering Symoisium*, 1999.
- [42] J.D. Moerlose, T.W. Dawson, M.A. Stuchly, Application of the finite difference time domain algorithm to quasi-static fields analysis, *Radio Science*, 32,2, 329-341, 1997.
- [43] P. Nopp, E. Rapp, H . Pfutzener, H. nakesch, C. Ruhsam, Dielectric properties of lung tissue as a function of air content, *Phys. Med. Biol.*, 38, 699-716, 1993.
- [44] Poljak, Roje, Currents induced in human body exposed to the power line electromagnetic field, 20th conference of IEEE engineering in medicine and biology society, vol. 20, no 6, p. 3281, 1998.
- [45] Reilly P J, *Applied Bioelectricity, from Electrical Stimulation to Electropathology*, Springer-Verlag, 1998.
- [46] Reivonen, Keikko, Isokorpi, Internal currents in a human body with spheroid model in 400 kV Switching substation, *IEE High Voltage Engineering Symposium*, 2.31.S2, 1999.

- [47] Scheneider, Studinger, Weck, Courants de déplacement vers le corps humain causés par le champ électrique sous les lignes de transport d'énergie, CIGRE, 36-34, 1974.
- [48] Spiegel, R.J., Magnetic coupling to a prolate spheroid model of a man, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1, 208-212, 1977.
- [49] Stuchly, Dawson, Human organ and tissue induced currents by 60 Hz Electric and Magnetic Fields, 19th conf. IEEE/EMBS, p.2464, 1997.
- [50] Stuchly, Dawson, Interaction of low frequency Electric and Magnetic fields with the human body, IEEE Proceedings, vol. 88o 5p. 643, 2000.
- [51] M. Stuchly, S. Stuchly, Dielectric properties of biological substances tubulated, J. microwave Power, 15:19-26, 1980.
- [52] M.A. Stuchly, S. Zhao, Magnetic field-induced currents in the human body in proximity of power lines, IEEE Trans. Power Delivery, 11, 1, 102-109, 1996.
- [53] A. Taflove, Review of the formulation and applications of the finite-difference time-domain method for numerical modeling of electromagnetic wave interaction with arbitrary structures, Wave Motion, vol. 10, no. 6, pp. 547-582, 1988.
- [54] A. Taflove, S Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Published by Artech house, 2000.
- [55] Takuma, Kawamoto, Isaka, Yokoi, A three dimensional Method for calculating currents induced in bodies by extremely low-frequency Electric fields, Bioelectromagnetics, no 11p. 71-89, 1990.
- [56] US Army Natick, 1988 Anthropometric Survey of US Army Personnel: Methods and summary statistics, NATICK/TR-89/044, 1988.
- [57] Xi, M.A. Stuchly, Induced electric currents in models of man and rodents from 60 Hz magnetic fields, IEEE Trans. Biom. Eng., 41, 11, 1018-1023, 1994.
- [58] K. S. Yee, Numerical solution of intial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [59] Yildirim, Kalenderli, Computation of electric field induced currents on human body standing under a high voltage transmission line by using charge simulation method, 2nd Int. Biomedical Engineering Days, p. 75, 1997.
- [60] E. Zheng, S. Shao, J.G. Webster, Impedance of skeletal muscle from 1 Hz to 1 MHz, IEEE Trans. Biom. Eng., 31, 477-481 (1984).
- [61] A. Stratton, Electromagnetic Theory, New York, Msgraw-Hill, 1941.
- [62] W. R. Smythe, Static and Dynamic Electricity, New York, McGraw-Hill, 1939.