

MÔ HÌNH TOÁN HỌC XÁC ĐỊNH BIẾN THIÊN NHIỆT ĐỘ TRONG DÂY CÁP ĐIỆN CÓ KỂ ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA TẢI KHÔNG ỔN ĐỊNH

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING TEMPERATURE VARIATIONS IN POWER CABLES THE EFFECTS OF UNSTABLE LOADS

Nguyễn Đăng Khoát^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.382>

TÓM TẮT

Dây cáp điện của hệ thống truyền tải điện năng luôn bị phát nóng khi có dòng điện chạy qua do hiệu ứng Joule - Lenz. Trên cơ sở phân tích cơ chế truyền nhiệt của dây và quá trình trao đổi nhiệt giữa bề mặt dây với môi trường xung quanh, bằng cách chia dây theo phương bán kính thành các phần tử và thiết lập phương trình cân bằng nhiệt cho các phần tử đó, thu được mô hình toán học xác định quy luật phân bố nhiệt độ trong dây khi tải không ổn định. Kết quả tính toán đã xác định được quy luật phân bố nhiệt độ và mức tăng nhiệt độ cực đại trong các lớp của dây cáp. Từ những kết quả đạt được đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của lớp vật liệu dẫn điện và ảnh hưởng của điều kiện môi trường xung quanh đến mức độ phát nóng của dây. Kết quả nghiên cứu cho thấy, ảnh hưởng của lớp vật liệu dẫn điện và ảnh hưởng của điều kiện môi trường xung quanh đến mức độ phát nóng của dây là rất đáng kể. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để tính toán, thiết kế và kiểm tra các loại dây cáp nhằm đảm bảo an toàn và tiết kiệm chi phí khi lựa chọn dây cho hệ thống truyền tải điện năng.

Từ khóa: Truyền nhiệt trong dây cáp, nhiệt độ của dây cáp, phân bố nhiệt độ trong dây cáp điện.

ABSTRACT

The electric cables of the power transmission system always get hot when current flows through them due to the Joule - Lenz effect. Based on the analysis of the heat transfer mechanism of the wire and the heat exchange process between the wire surface and the surrounding environment, by dividing the wire radially into elements and establishing the heat balance equation for the parts. From there, a mathematical model is obtained that determines the temperature distribution law in the wire when the load is unstable. The calculation results have determined the temperature distribution rules and the maximum temperature increase in the layers of the cable. From there, research is conducted on the influence of the conductive material layer and the influence of surrounding environmental conditions on the level of heating of the wire. Research results show that the influence of the conductive material layer and the influence of surrounding environmental conditions on the level of heating of the wire is very significant. The research results are the basis for calculating, designing, and testing cables to ensure safety and save costs when choosing cables for power transmission systems.

Keywords: Heat transfer in electrical cables, temperature of the cables, temperature variations in power cables.

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Email: ndkhoat_ktn@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/11/2024

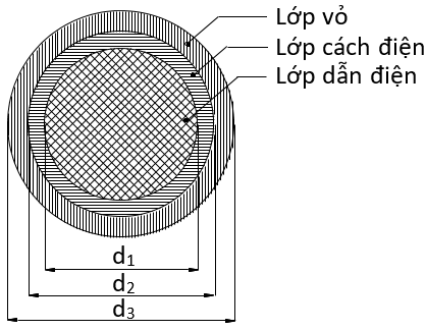
Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dây cáp điện là thiết bị không thể thiếu trong hệ thống truyền tải và phân phối điện, giúp truyền tải điện năng từ nhà máy phát điện hoặc trạm biến áp đến các hộ

tiêu thụ. Theo [4], hệ thống truyền tải điện hiện nay, dây cáp có thể là dây trần sử dụng vật liệu dẫn điện là nhôm để truyền tải điện cao áp, siêu cao áp từ nguồn phát đến các trạm biến áp với cấp điện áp danh định trên 35kV; dây

có lớp vỏ cách điện đặt ngầm dưới lòng đất hoặc đặt bên ngoài môi trường không khí được sử dụng để truyền tải điện trung áp và hạ áp từ các trạm phân phối đến các trạm biến áp rồi đến các hộ tiêu thụ. Cấu tạo của dây truyền tải điện hạ áp và trung áp thường gồm 3 lớp: lớp vật liệu dẫn điện bằng nhôm hoặc bằng đồng, lớp cách điện bằng vật liệu XLPE và lớp vỏ ngoài cùng bằng nhựa PVC. Mặt cắt ngang của dây được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Mặt cắt ngang của dây cáp điện

Do tính khái quát của quá trình truyền nhiệt trong dây cáp khi tải không ổn định, trong nghiên cứu này chúng tôi chọn dây truyền tải điện hạ áp và trung áp đặt bên ngoài môi trường không khí làm đối tượng tính toán.

Khả năng chịu nhiệt hay khả năng chịu tải là thông số quan trọng bậc nhất khi tính toán thiết kế dây cáp. Theo hiệu ứng Joule - Lenz, khi có tải, nhiệt độ của dây cáp sẽ tăng lên. Mức tăng nhiệt độ của dây phụ thuộc vào cường độ dòng điện, tính chất vật lý và điều kiện tỏa nhiệt ra môi trường của dây. Ở cùng điều kiện như nhau, dòng điện chạy qua dây càng lớn thì nhiệt độ của dây càng tăng cao. Nếu nhiệt độ của dây tăng cao quá mức sẽ làm giảm độ bền cơ học, tính chất dẫn điện của dây; thậm chí có thể phá hủy lớp vật liệu cách điện hay lớp vỏ gây mất an toàn khi sử dụng. Theo M. H. Shwehdi, M. A. Morsy và A. Abugurain [11], giới hạn chịu nhiệt tối đa của cáp sử dụng lớp vỏ bọc PVC là 70°C; sử dụng lớp XLPE là 90°C. Mặt khác, trong vận hành thực tế của hệ thống truyền tải điện, cường độ dòng điện chạy trong dây cáp thường xuyên thay đổi do sự thay đổi của phụ tải, điều này làm cho nhiệt độ của dây cũng biến thiên. Để tính toán thiết kế dây cáp đảm bảo điều kiện chịu nhiệt, cần thiết phải xây dựng mô hình tính toán xác định biến thiên nhiệt độ của dây khi có phụ tải thay đổi. Vì lý do này, đã có nhiều công trình nghiên cứu nhằm xây dựng mối quan hệ giữa mức độ phát nhiệt và phụ tải chạy qua dây. Một trong những công trình nghiên cứu đầu tiên theo hướng này là công trình nghiên cứu của Neher J.H. và McGrath M.H [12]. Theo đó, Neher J.H. và McGrath M.H đã xây dựng phương trình tính toán mức tăng nhiệt của dây cáp ngầm khi có

dòng điện chạy qua ở điều kiện tải không đổi. Tuy nhiên, khi áp dụng phương trình tính toán này cho dây cáp đặt bên ngoài môi trường không khí hoặc khi phụ tải thay đổi thì kết quả tính toán không còn chính xác nữa. Cũng theo hướng nghiên cứu này, sử dụng công thức tính toán trong [6, 10, 14] có thể xác định được cường độ dòng điện định mức theo khả năng chịu nhiệt của dây. Tuy nhiên, các công thức tính toán này chỉ cho phép tính toán dây cáp ngầm ở điều kiện tải ổn định. Một số kết quả nghiên cứu tương tự có thể tìm thấy trong [3, 13, 15]. Phân tích các kết quả nghiên cứu này nhận thấy, phân bố nhiệt độ trong dây cáp khi có tải không ổn định chưa được đề cập nhiều và chưa được giải quyết trọn vẹn. Trong nghiên cứu này, tác giả tiến hành xây dựng mô hình toán học xác định quy luật phân bố nhiệt độ của dây cáp có kể đến ảnh hưởng của tải không ổn định để làm cơ sở cho tính toán, thiết kế và kiểm tra các loại dây cáp nhằm đảm bảo an toàn và tiết kiệm chi phí khi lựa chọn dây cho hệ thống truyền tải điện năng.

2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

2.1. Mô hình toán học xác định biến thiên nhiệt độ trong dây cáp khi tải không ổn định

Hiện nay, dây cáp sử dụng cho hệ thống truyền tải điện năng phổ biến là dây dạng hình trụ có chiều dài lớn hơn rất nhiều so với đường kính. Với kết cấu này, gradien nhiệt độ theo phương bán kính lớn hơn nhiều so với phương chiều dài. Khi đó, biến thiên nhiệt độ trong dây có thể xem như chỉ thay đổi theo phương bán kính [5, 9]. Do hiệu ứng Joule - Lenz, nhiệt sinh ra trong lớp dẫn điện sẽ truyền đến lớp cách điện và lớp vỏ bằng phương thức dẫn nhiệt; tại bề mặt lớp vỏ, nhiệt truyền ra môi trường không khí xung quanh bằng đối lưu và bức xạ. Để xây dựng mô hình toán học xác định biến thiên nhiệt độ trong dây khi tải không ổn định, cần chấp nhận một số giả thiết sau:

- Lớp vật liệu dẫn điện, cách điện và lớp vỏ là những vật liệu đồng chất, đẳng hướng.
- Thông số nhiệt vật lý của các lớp vật liệu trong dây không phụ thuộc vào nhiệt độ.
- Coi tiếp xúc giữa các lớp trong dây là tuyệt đối.
- Nguồn sinh nhiệt bên trong của dây phân bố đều theo thể tích.

Trên cơ sở phân tích cơ chế truyền nhiệt trong dây cáp và các giả thiết đã đề cập ở trên, mô hình tính toán phân bố nhiệt độ trong dây khi tải không ổn định được xây dựng. Theo phương bán kính, chia các lớp vật liệu của dây thành các phần tử có kích thước đủ nhỏ để đảm bảo độ

chính xác khi tính toán, nhiệt độ tại tâm của mỗi phần tử bên trong được coi là nhiệt độ của phần tử đó, nhiệt độ phần tử biên là nhiệt độ tại giữa bề mặt biên. Phương trình cân bằng nhiệt cho các phần tử được viết như sau:

$$\rho_i \cdot C_i \cdot V_i \cdot \frac{t_i^{m+1} - t_i^m}{\Delta\tau} = Q_i + Q_t \tag{1}$$

Trong đó:

ρ_i - khối lượng riêng của phần tử tính toán, kg/m³

C_i - nhiệt dung riêng của phần tử tính toán, J/kg.K

V_i - thể tích của phần tử tính toán, m³

$\Delta\tau$ - khoảng thời gian biến thiên, s

Q_i - dòng nhiệt truyền qua phần tử tính toán bằng dẫn nhiệt, W

Q_t - dòng nhiệt sinh ra bên trong phần tử tính toán, W

t_i - nhiệt độ của phần tử tính toán thứ i , °C

i - phần tử tính toán thứ i của dây cáp

m - bước thời gian.

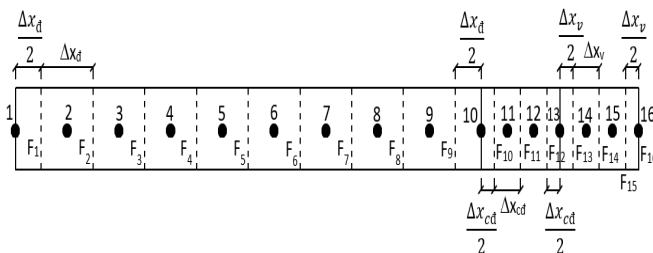
Trên cơ sở này, tác giả tiến hành xây dựng phương trình cân bằng nhiệt cho các phần tử của dây cáp với các thông số tính toán được Công ty cổ phần dây cáp điện Việt Nam cung cấp và được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của dây cáp điện

STT	Thông số dây cáp	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Đường kính lớp dẫn điện bằng đồng	d_1	20,5	mm
2	Chiều dày lớp cách điện bằng XLPE	δ_{cd}	1,8	mm
3	Chiều dày lớp vỏ bằng PVC	δ_v	1,9	mm
4	Điện trở suất của lớp dẫn điện	ρ	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
5	Hệ số dẫn nhiệt của lớp dẫn điện	λ_d	399	W/m.K
6	Hệ số dẫn nhiệt của lớp cách điện	λ_{cd}	0,332	W/m.K
7	Hệ số dẫn nhiệt của lớp vỏ	λ_v	0,14	W/m.K
8	Khối lượng riêng của lớp dẫn điện	ρ_d	8342	kg/m ³
9	Khối lượng riêng của lớp cách điện	ρ_{cd}	315,86	kg/m ³
10	Khối lượng riêng của lớp vỏ	ρ_v	1250	kg/m ³
11	Nhiệt dung riêng của lớp dẫn điện	$C_{p,d}$	387	J/kg.K
12	Nhiệt dung riêng của lớp cách điện	$C_{p,cd}$	1750	J/kg.K
13	Nhiệt dung riêng của lớp vỏ	$C_{p,v}$	950	J/kg.K

Từ các thông số kỹ thuật của dây cáp trong bảng 1, theo phương bán kính tính từ tâm của dây, chia lớp dẫn điện thành 10 phần tử, trong đó mỗi phần tử từ 2 đến 9 đều có chiều dày 0,0011m, phần tử 1 và phần tử 10, mỗi

phần tử có chiều dày 0,00055m; chia lớp cách điện thành 4 phần tử, trong đó mỗi phần tử bên trong đều có chiều dày 0,0006m, hai phần tử còn lại có các bề mặt tiếp xúc với lớp dẫn điện và lớp vỏ có chiều dày 0,0003m; chia lớp vỏ thành 4 phần tử, trong đó mỗi phần tử bên trong có chiều dày 0,00063m, hai phần tử còn lại có bề mặt tiếp xúc với lớp cách điện và bề mặt tiếp xúc với môi trường có chiều dày 0,000315 m. Do tính đối xứng về kết cấu của dây nên các phần tử tính toán được mô hình hóa và được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Mô hình hóa các phần tử tính toán của dây cáp điện

Từ phương trình cân bằng nhiệt (1) và mô hình hóa các phần tử của dây cáp ở hình 2. Phương trình cân bằng nhiệt tại các nút của các phần tử được thiết lập như sau:

Tại nút 1:

$$\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{1,d}}{\Delta\tau} \cdot (t_1^{m+1} - t_1^m) = I^2 \cdot R - \frac{\lambda_d \cdot F_1}{\Delta x_d} \cdot (t_1^{m+1} - t_2^{m+1}) \tag{2a}$$

Hay:

$$\left(\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{1,d}}{\Delta\tau} + \frac{\lambda_d \cdot F_1}{\Delta x_d} \right) \cdot t_1^{m+1} - \frac{\lambda_d \cdot F_1}{\Delta x_d} \cdot t_2^{m+1} = I^2 \cdot R + \frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{1,d}}{\Delta\tau} \cdot t_1^m \tag{2b}$$

Tại nút i ($i = 2 \div 9$):

$$\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{i,d}}{\Delta\tau} \cdot (t_i^{m+1} - t_i^m) = I^2 \cdot R + \frac{\lambda_d \cdot F_{i-1}}{\Delta x_d} \cdot (t_{i-1}^{m+1} - t_i^{m+1}) - \frac{\lambda_d \cdot F_i}{\Delta x_d} \cdot (t_i^{m+1} - t_{i+1}^{m+1}) \tag{3a}$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_d \cdot F_{i-1}}{\Delta x_d} \cdot t_{i-1}^{m+1} + \left(\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{i,d}}{\Delta\tau} + \frac{\lambda_d \cdot F_{i-1}}{\Delta x_d} + \frac{\lambda_d \cdot F_i}{\Delta x_d} \right) \cdot t_i^{m+1} - \frac{\lambda_d \cdot F_i}{\Delta x_d} \cdot t_{i+1}^{m+1} = I^2 \cdot R + \frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{i,d}}{\Delta\tau} \cdot t_i^m \tag{3b}$$

Tại nút 10:

$$\left(\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{10,d}}{\Delta\tau} + \frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{10,cd}}{\Delta\tau} \right) \cdot (t_{10}^{m+1} - t_{10}^m) = I^2 \cdot R + \frac{\lambda_d \cdot F_9}{\Delta x_d} \cdot (t_9^{m+1} - t_{10}^{m+1}) - \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{10}}{\Delta x_{cd}} \cdot (t_{10}^{m+1} - t_{11}^{m+1}) \tag{4a}$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_d \cdot F_9}{\Delta X_d} \cdot t_9^{m+1} + \left(\frac{\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{10,d}}{\Delta \tau}}{\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{10,cd}}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_d \cdot F_9}{\Delta X_d} + \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{10}}{\Delta X_{cd}}} \right) \cdot t_{10}^{m+1} - \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{10}}{\Delta X_{cd}} \cdot t_{11}^{m+1} = I^2 \cdot R + \left(\frac{\frac{\rho_d \cdot C_{p,d} \cdot V_{10,d}}{\Delta \tau}}{\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{10,cd}}{\Delta \tau}} \right) \cdot t_{10}^m \quad (4b)$$

Tại nút i (i = 11 ÷ 12):

$$\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{i,cd}}{\Delta \tau} \cdot (t_i^{m+1} - t_i^m) = \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{i-1}}{\Delta X_{cd}} \cdot (t_{i-1}^{m+1} - t_i^{m+1}) - \frac{\lambda_{cd} \cdot F_i}{\Delta X_{cd}} \cdot (t_i^{m+1} - t_{i+1}^{m+1}) \quad (5a)$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_{cd} \cdot F_{i-1}}{\Delta X_{cd}} \cdot t_{i-1}^{m+1} + \left(\frac{\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{i,cd}}{\Delta \tau}}{\frac{\lambda_{cd} \cdot F_{i-1}}{\Delta X_{cd}} + \frac{\lambda_{cd} \cdot F_i}{\Delta X_{cd}}} \right) \cdot t_i^{m+1} - \frac{\lambda_{cd} \cdot F_i}{\Delta X_{cd}} \cdot t_{i+1}^{m+1} = \frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{i,cd}}{\Delta \tau} \cdot t_i^m \quad (5b)$$

Tại nút 13:

$$\left(\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{13,cd}}{\Delta \tau} + \frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{13,v}}{\Delta \tau} \right) \cdot (t_{13}^{m+1} - t_{13}^m) = \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{12}}{\Delta X_{cd}} \cdot (t_{12}^{m+1} - t_{13}^{m+1}) - \frac{\lambda_v \cdot F_{13}}{\Delta X_v} \cdot (t_{13}^{m+1} - t_{14}^{m+1}) \quad (6a)$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_{cd} \cdot F_{12}}{\Delta X_{cd}} \cdot t_{12}^{m+1} + \left(\frac{\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{13,cd}}{\Delta \tau}}{\frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{13,v}}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_{cd} \cdot F_{12}}{\Delta X_{cd}} + \frac{\lambda_v \cdot F_{13}}{\Delta X_v}} \right) \cdot t_{13}^{m+1} - \frac{\lambda_v \cdot F_{13}}{\Delta X_v} \cdot t_{14}^{m+1} = \left(\frac{\rho_{cd} \cdot C_{p,cd} \cdot V_{13,cd}}{\Delta \tau} + \frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{13,v}}{\Delta \tau} \right) \cdot t_{13}^m \quad (6b)$$

Tại nút i (i = 14 ÷ 15):

$$\frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{i,v}}{\Delta \tau} \cdot (t_i^{m+1} - t_i^m) = \frac{\lambda_v \cdot F_{i-1}}{\Delta X_v} \cdot (t_{i-1}^{m+1} - t_i^{m+1}) - \frac{\lambda_v \cdot F_i}{\Delta X_v} \cdot (t_i^{m+1} - t_{i+1}^{m+1}) \quad (7a)$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_v \cdot F_{i-1}}{\Delta X_v} \cdot t_{i-1}^{m+1} + \left(\frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{i,v}}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_v \cdot F_{i-1}}{\Delta X_v} + \frac{\lambda_v \cdot F_i}{\Delta X_v} \right) \cdot t_i^{m+1} - \frac{\lambda_v \cdot F_i}{\Delta X_v} \cdot t_{i+1}^{m+1} = \frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{i,v}}{\Delta \tau} \cdot t_i^m \quad (7b)$$

Tại nút 16:

$$\frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{16,v}}{\Delta \tau} \cdot (t_{16}^{m+1} - t_{16}^m) = \frac{\lambda_v \cdot F_{15}}{\Delta X_v} \cdot (t_{15}^{m+1} - t_{16}^{m+1}) - \alpha \cdot F_{16} \cdot (t_{16}^{m+1} - t_f) \quad (8a)$$

Hay:

$$-\frac{\lambda_v \cdot F_{15}}{\Delta X_v} \cdot t_{15}^{m+1} + \left(\frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{16,v}}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_v \cdot F_{15}}{\Delta X_v} + \alpha \cdot F_{16} \right) \cdot t_{16}^{m+1} = \frac{\rho_v \cdot C_{p,v} \cdot V_{16,v}}{\Delta \tau} \cdot t_{16}^m + \alpha \cdot F_{16} \cdot t_f \quad (8b)$$

Trong đó:

$\rho_d, \rho_{cd}, \rho_v$ - khối lượng riêng của lớp dẫn điện, cách điện và lớp vỏ, kg/m³

$C_{p,d}, C_{p,cd}, C_{p,v}$ - nhiệt dung riêng khối lượng của lớp dẫn điện, cách điện và lớp vỏ, J/kg.K

V_i - thể tích của các phần tử tính toán, m³

α - hệ số trao đổi nhiệt giữa bề mặt lớp vỏ với môi trường, W/m².K

t_f - nhiệt độ môi trường xung quanh dây, °C

F_i - diện tích bề mặt truyền nhiệt của phần tử tính toán, m²

I - cường độ dòng điện chạy qua dây, A

R - điện trở của lớp dẫn điện, Ω

Hệ gồm các phương trình (2b), (3b), (4b), (5b), (6b), (7b), (8b) chính là mô hình toán học mô tả quá trình truyền nhiệt trong dây cáp khi tải không ổn định. Giải hệ phương trình với các thông số kỹ thuật của dây cáp và với điều kiện môi trường xung quanh sẽ xác định được quy luật phân bố nhiệt độ trong dây. Từ đó làm cơ sở để tính toán, thiết kế và kiểm tra các loại dây cáp trong hệ thống truyền tải điện năng.

2.2. Phương pháp xác định hệ số trao đổi nhiệt

Như đã phân tích ở trên, nhiệt truyền từ bề mặt lớp vỏ của dây ra môi trường không khí xung quanh bằng bức xạ và đối lưu. Tuy nhiên, do nhiệt độ làm việc tối đa của dây sử dụng lớp vỏ PVC không được phép quá 70°C [11] và do lớp vỏ PVC của dây cáp thường có màu đen nên tỷ số giữa hệ số hấp thụ bức xạ mặt trời và hệ số bức xạ của chúng không quá lớn [1] nên có thể xem nhiệt lượng trao đổi giữa bề mặt lớp vỏ với môi trường không khí xung quanh chủ yếu bằng phương thức trao đổi nhiệt đối lưu mà không gặp phải sai số lớn khi tính toán [5, 9]. Đã có nhiều công trình nghiên cứu tính toán hệ số trao đổi nhiệt đối lưu giữa bề mặt của ống hình trụ với môi trường không khí chuyển động xung quanh, có thể tìm thấy các kết quả này trong [1, 5, 9]. Vấn đề cơ bản khi xác định hệ số trao đổi nhiệt đối lưu đảm bảo độ chính xác là lựa chọn phương trình tiêu chuẩn phải phù hợp với các điều kiện biên thực tế của bài toán. Fand R. M. [8] đã xây dựng phương trình tiêu chuẩn cho phép xác định hệ số trao đổi nhiệt giữa bề mặt của ống hình trụ với môi trường chất lỏng trong phạm vi có trị số

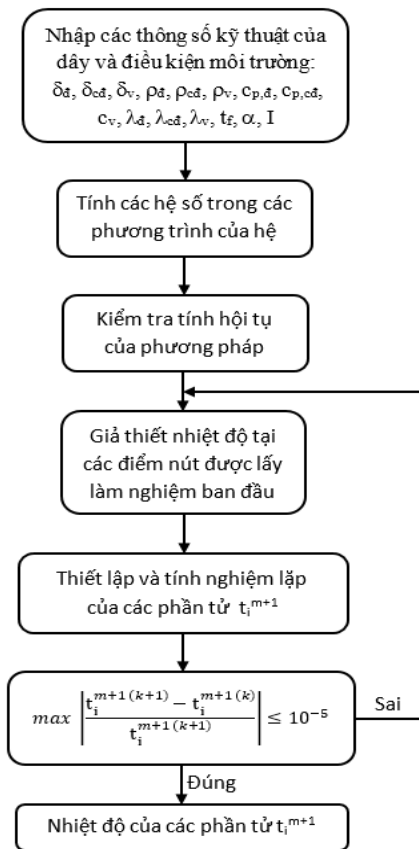
Reynolds từ 10^{-1} đến 10^5 . Từ phương trình tiêu chuẩn này và trên cơ sở lý thuyết truyền nhiệt, Eckert E. R. G., và R. M. Drake [7] đã bỏ qua ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ đến trị số Prandtl để tính toán hệ số trao đổi nhiệt của không khí chảy cắt ngang qua bề mặt ngoài của ống và cho kết quả với sai số không vượt quá 3%. Do đối tượng tính toán trong nghiên cứu này là dây cáp được đặt bên ngoài môi trường không khí nên phương trình tiêu chuẩn của Fand, R. M. [8] được chúng tôi lựa chọn để tính toán hệ số trao đổi nhiệt giữa bề mặt lớp vỏ của dây với môi trường không khí. Phương trình tiêu chuẩn của Fand R. M. [8] khi bỏ qua ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ đến trị số Prandtl có dạng như sau:

$$Nu_f = 0,35 + 0,56 \cdot Re_f^{0,52} \text{ với } Re_f = 10^{-1} \div 10^5 \quad (9)$$

Ở đây, tiêu chuẩn Reynolds: $Re_f = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$ với ω , l , ν lần lượt là tốc độ chuyển động của không khí (m/s), kích thước xác định (m) và độ nhớt động học của không khí (m^2/s).

Trong phương trình trên, nhiệt độ xác định là nhiệt độ trung bình của không khí xung quanh dây cáp và kích thước xác định là đường kính ngoài của dây. Kết quả tính toán hệ số trao đổi nhiệt đối lưu được trình bày trong mục 3.

2.3. Phương pháp giải mô hình toán học



Hình 3. Sơ đồ khối giải mô hình toán học

Mô hình toán học đã xây dựng là một hệ gồm 16 phương trình đại số tuyến tính. Có thể giải hệ phương trình bằng phương pháp khử hoặc bằng phương pháp số. Tuy nhiên, do hệ phương trình gồm nhiều ẩn số nên nếu giải bằng phương pháp khử sẽ gặp rất nhiều khó khăn. Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn phương pháp lặp Gauss - Seidel để giải mô hình toán học trên. Đây là một trong những phương pháp gần đúng được sử dụng rất phổ biến và có tốc độ hội tụ nhanh nhất trong số các phương pháp lặp để giải hệ phương trình đại số tuyến tính. Nội dung cơ bản của phương pháp Gauss - Seidel được trình bày rất kỹ trong các tài liệu chuyên ngành [2]. Sơ đồ khối giải mô hình toán học được thể hiện trên hình 3.

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

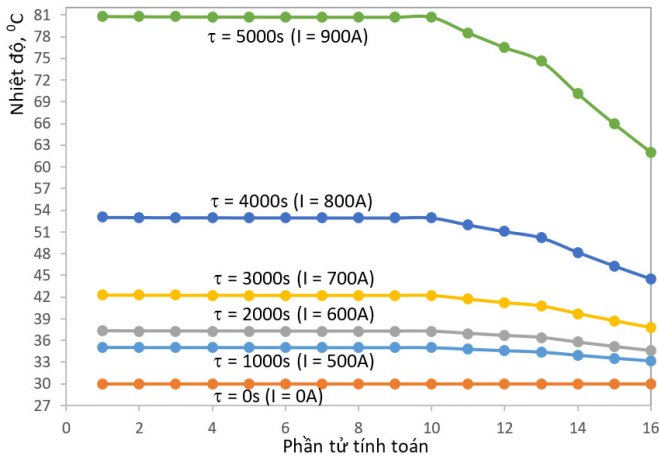
3.1. Phân bố nhiệt độ và mức tăng nhiệt độ cực đại trong dây cáp khi tải không ổn định

Từ kết quả nghiên cứu trên, chúng tôi tiến hành tính toán phân bố nhiệt độ của dây cáp với các thông số tính toán được cho trong bảng 1 và với điều kiện môi trường không khí xung quanh có nhiệt độ 30°C, tốc độ chuyển động 1m/s. Với những điều kiện này, từ kết quả nghiên cứu được trình bày ở mục 2.2, xác định được hệ số trao đổi nhiệt giữa bề mặt lớp vỏ của dây và không khí xung quanh bằng 26,32W/m².K. Thông số này là một trong những điều kiện biên quan trọng để xác định quy luật biến thiên nhiệt của dây cáp đặt bên ngoài môi trường khi có tải không ổn định. Kết quả tính toán phân bố nhiệt độ của dây được thể hiện trong bảng 2 và trên hình 4.

Bảng 2. Biến thiên nhiệt độ trong dây cáp đồng khi tải không ổn định, °C

Phần tử	I = 0A	I = 500A	I = 600A	I = 700A	I = 800A	I = 900A
1	30	35,02165	37,29894	42,27501	53,02827	80,82642
2	30	35,01173	37,28471	42,25558	53,00276	80,79368
3	30	35,00598	37,27647	42,24431	52,98786	80,77428
4	30	35,00158	37,27017	42,23566	52,97635	80,75903
5	30	34,99813	37,26525	42,22887	52,96721	80,7466
6	30	34,9955	37,26151	42,22366	52,96008	80,73657
7	30	34,99363	37,25886	42,21992	52,95481	80,72872
8	30	34,99247	37,25725	42,21758	52,95133	80,72295
9	30	34,99202	37,25665	42,2166	52,94956	80,71921
10	30	34,99226	37,25706	42,21697	52,9495	80,71743
11	30	34,76697	36,95021	41,69767	51,97211	78,54931
12	30	34,55772	36,66284	41,21133	51,05612	76,51645
13	30	34,36291	36,39299	40,75464	50,19533	74,60523
14	30	33,91103	35,75753	39,68088	48,17313	70,12096

15	30	33,49502	35,16046	38,67418	46,2798	65,93039
16	30	33,11073	34,59781	37,72746	44,5016	62,00191

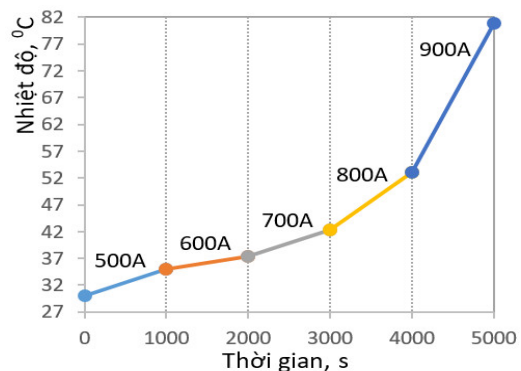


Hình 4. Phân bố nhiệt độ trong dây cáp đồng khi tải không ổn định

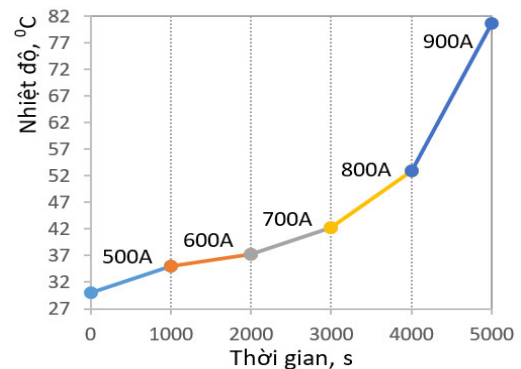
Từ đồ thị hình 4 cho thấy, tại thời điểm ban đầu, khi dây chưa có tải, nhiệt độ tại mọi điểm trong các lớp vật liệu của dây đều có nhiệt độ như nhau. Khi dây có tải, nhiệt độ trong dây bắt đầu tăng lên, đạt giá trị lớn nhất tại tâm của lớp dẫn điện. Kết quả này phản ánh đúng hiệu ứng của định luật Joule - Lenz. Cũng từ đồ thị cho thấy, theo phương bán kính, nhiệt độ của dây giảm dần từ tâm của lớp dẫn điện ra bên ngoài và đạt giá trị thấp nhất tại bề mặt của lớp vỏ. Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu về cơ chế truyền nhiệt trong các vật thể có nguồn nhiệt và không có nguồn nhiệt bên trong đã được đề cập trong [5, 9]. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra biến thiên nhiệt độ trong lớp dẫn điện là nhỏ nhất, xảy ra trong lớp vỏ là lớn nhất. Chẳng hạn, kết quả tính toán ở bảng 2 cho thấy, khi cường độ dòng điện chạy qua dây là 600A tương ứng với thời điểm $\tau = 2000s$ thì chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của lớp dẫn điện là $0,0789^{\circ}C$, chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt trong và bề mặt ngoài của lớp cách điện là $0,5542^{\circ}C$; trong khi chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt trong và bề mặt ngoài của lớp vỏ là $1,1538^{\circ}C$. Có chênh lệch mức nhiệt độ trên là do lớp vật liệu dẫn điện có hệ số dẫn nhiệt lớn hơn rất nhiều so với lớp cách điện và lớp vỏ. Cũng từ đồ thị hình 4 nhận thấy, quy luật phân bố nhiệt độ trong dây khi thời gian thay đổi từ 1000s đến 5000s tương ứng với cường độ dòng điện thay đổi từ 500A đến 900A có dạng giống nhau như đã phân tích ở trên nhưng nhiệt độ trong các lớp vật liệu của dây tăng lên khi cường độ dòng điện tăng. Mức tăng nhiệt độ cực đại của mỗi lớp vật liệu khi cường độ dòng điện tăng lên được thể hiện trên đồ thị hình 5a, 5b và 5c.

Từ các đồ thị hình 5a, 5b và 5c nhận thấy, khi cường độ dòng điện hay phụ tải tăng lên thì nhiệt độ cực đại của

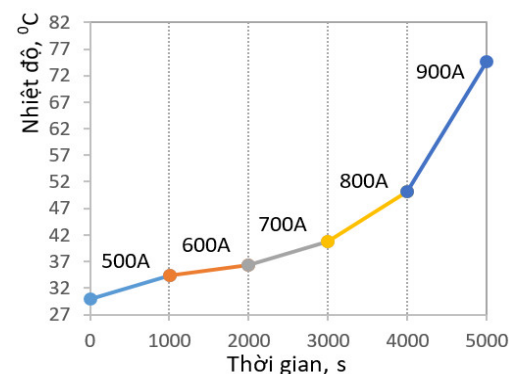
mỗi lớp vật liệu đều tăng. Kết quả này phản ánh đúng hiệu ứng phát nóng của định luật Joule - Lenz. Kết quả tính toán còn cho biết, khi dòng điện chạy qua dây bằng 900A thì nhiệt độ cực đại của lớp vỏ PVC đạt $70,12^{\circ}C$. Ở mức nhiệt độ này, theo M. H. Shwehdi, M. A. Morsy, và A. Abugurain [11] dây cáp sẽ bị phá hủy, gây mất an toàn trong vận hành hệ thống truyền tải điện. Vì vậy, kết quả tính toán thu được có thể khẳng định rằng, với thông số dây cáp cho trong bảng 1 và với điều kiện môi trường không khí xung quanh dây có nhiệt độ $30^{\circ}C$, tốc độ chuyển động $1m/s$ thì cường độ dòng điện tối đa chạy qua dây không được phép vượt quá 900A. Giá trị này là thông số rất quan trọng khi tính toán, thiết kế và lựa chọn dây cáp cho hệ thống truyền tải điện.



Hình 5a. Mức tăng nhiệt độ cực đại trong lớp dẫn điện khi tải tăng lên



Hình 5b. Mức tăng nhiệt độ cực đại trong lớp cách điện khi tải tăng lên



Hình 5c. Mức tăng nhiệt độ cực đại trong lớp vỏ khi tải tăng lên

Độ chính xác của mô hình tính toán cần được kiểm chứng bằng thực nghiệm hoặc đánh giá thông qua những kết quả nghiên cứu đã được công bố trước đây. Với mô hình toán học được xây dựng dựa trên việc thiết lập các phương trình cân bằng nhiệt có đánh giá thực tế các điều kiện biên cũng như phương pháp xác định các hệ số trong mô hình đã được kiểm chứng về độ chính xác và kết quả đạt được phù hợp với quy luật phân bố nhiệt độ đã được công bố trước đây thì có thể khẳng định rằng kết quả nghiên cứu là đáng tin cậy, có thể áp dụng trong thực tiễn để tính toán thiết kế và kiểm tra dây cáp cho hệ thống truyền tải điện năng.

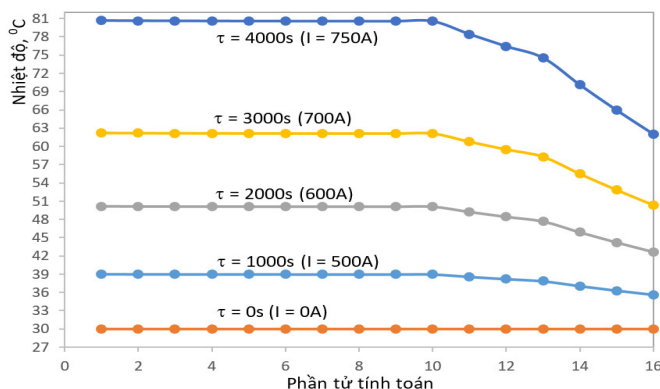
Trên cơ sở kết quả đạt được, tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của lớp vật liệu dẫn điện đến sự biến thiên nhiệt độ của dây. Theo đó, với thông số tính toán và điều kiện môi trường như tính đối với dây cáp đồng nhưng lớp vật liệu dẫn điện được thay thế bằng vật liệu là nhôm. Kết quả tính toán phân bố nhiệt độ được thể hiện trong bảng 3 và trên đồ thị hình 6. Mức tăng nhiệt độ cực đại trong dây cáp nhôm so với dây cáp đồng được thể hiện trên đồ thị hình 7.

Bảng 3. Biến thiên nhiệt độ trong dây cáp nhôm khi tải không ổn định, °C

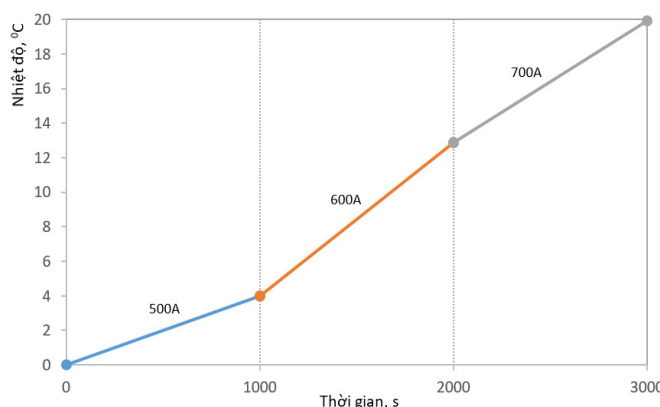
Phần tử	I = 0A	I = 500A	I = 600A	I = 700A	I = 750A
1	30	39,02643	50,15550	62,20388	80,66430
2	30	39,01076	50,13285	62,17301	80,62862
3	30	39,00166	50,11962	62,15494	80,60757
4	30	38,99468	50,10941	62,14094	80,5911
5	30	38,9892	50,10129	62,12975	80,57776
6	30	38,98499	50,09496	62,12098	80,56709
7	30	38,98197	50,09028	62,11442	80,55886
8	30	38,98007	50,08718	62,10998	80,55296
9	30	38,97928	50,08562	62,10759	80,54931
10	30	38,97956	50,08555	62,10721	80,54787
11	30	38,97514	49,22255	60,7539	78,42448
12	30	38,19924	48,41467	59,48347	76,42926
13	30	37,84903	47,65637	58,28757	74,54925
14	30	37,03645	45,87854	55,47169	70,12007
15	30	36,28817	44,21856	52,8274	65,95805
16	30	35,59676	42,66375	50,33683	62,03547

Từ đồ thị hình 6 nhận thấy, khi thay đổi lớp vật liệu dẫn điện và giữ nguyên các điều kiện khác thì quy luật phân bố nhiệt độ trong dây cáp nhôm và trong dây cáp đồng có dạng giống nhau, nhiệt độ vẫn đạt giá trị cực đại tại tâm của lớp dẫn điện, giảm dần theo phương bán kính ra

phía ngoài và đạt giá trị cực tiểu tại bề mặt lớp vỏ. Nhưng kết quả tính toán thể hiện trên đồ thị hình 7 cho thấy, ở cùng điều kiện phụ tải như nhau, mức nhiệt độ trong dây cáp nhôm cao hơn mức nhiệt độ trong dây cáp đồng. Cụ thể, ở cùng điều kiện dòng điện chạy qua dây là 500A thì mức tăng nhiệt độ lớn nhất là 4°C, khi dòng điện chạy qua dây là 600A thì mức tăng nhiệt độ lớn nhất là 12,86°C, khi dòng điện chạy qua dây là 700A thì mức tăng nhiệt độ này là 19,93°C. Sở dĩ có mức tăng nhiệt độ này là do nhôm có điện trở suất cao hơn so với vật liệu là đồng. Kết quả tính toán còn cho biết, khi dòng điện chạy qua dây bằng 750A thì nhiệt độ cực đại của lớp vỏ PVC là 70,12°C. Với mức nhiệt độ này, theo [11] có thể khẳng định rằng, đối với dây cáp nhôm có thông số kỹ thuật tương tự như dây cáp đồng cho trong bảng 1 và với môi trường không khí xung quanh có nhiệt độ 30°C, tốc độ chuyển động 1m/s thì dòng điện tối đa chạy qua dây không được phép vượt quá 750A.



Hình 6. Phân bố nhiệt độ trong dây cáp nhôm khi tải thay đổi

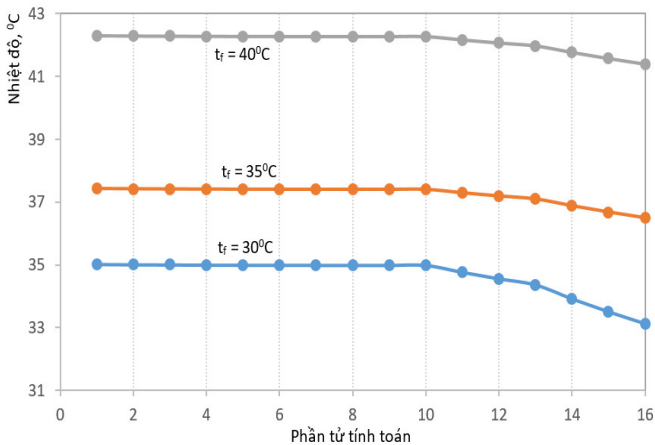


Hình 7. Mức tăng nhiệt độ cực đại trong dây cáp nhôm so với dây cáp đồng khi tải thay đổi

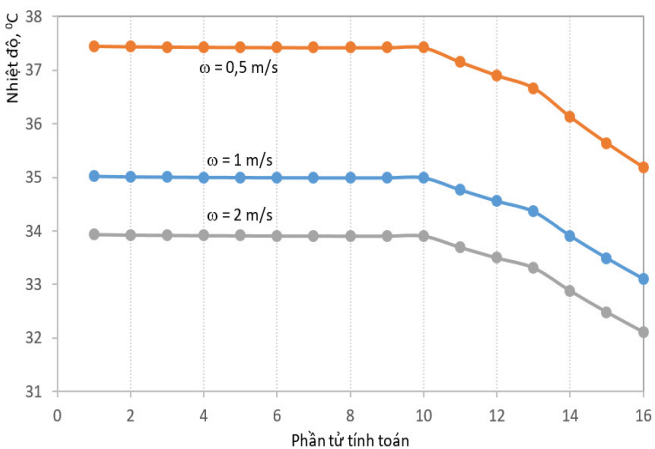
3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ không khí đến phân bố nhiệt độ trong dây cáp

Mô hình toán học còn cho phép nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ chuyển động của không khí xung quanh dây đến sự phân bố nhiệt độ trong các lớp

vật liệu của dây. Theo đó, tiến hành tính toán phân bố nhiệt độ trong các lớp của dây cáp đồng ứng với dòng điện chạy qua dây là 500A khi nhiệt độ không khí xung quanh dây tương ứng là 30°C, 35°C, 40°C và tốc độ không khí là 1m/s. Kết quả tính toán được thể hiện trên đồ thị hình 8. Cũng tương tự, tiến hành tính toán phân bố nhiệt độ trong các lớp của dây khi tốc độ không khí chuyển động xung quanh dây thay đổi tương ứng là 0,5m/s, 1m/s, 2m/s và nhiệt độ không khí là 30°C. Kết quả tính toán được thể hiện trên đồ thị hình 9.



Hình 8. Ảnh hưởng của nhiệt độ không khí xung quanh dây đến sự phân bố nhiệt độ trong các lớp vật liệu của dây



Hình 9. Ảnh hưởng của tốc độ không khí xung quanh dây đến sự phân bố nhiệt độ trong các lớp vật liệu của dây

Từ đồ thị hình 8 nhận thấy, ở cùng điều kiện phụ tải như nhau, khi nhiệt độ môi trường không khí xung quanh dây tăng lên thì quy luật phân bố nhiệt độ trong dây có dạng giống nhau nhưng mức nhiệt trong dây tăng lên. Kết quả tính toán với dòng điện chạy qua dây cáp có thông số tính toán như trong bảng 1 và tốc độ chuyển động của không khí bằng 1m/s thì khi nhiệt độ môi trường tăng lên từ 30°C đến 40°C, nhiệt độ cực đại của dây sẽ tăng từ 35,02°C lên 42,30°C, tức độ tăng nhiệt độ của

dây là 7,28°C. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ không khí đến sự biến thiên nhiệt độ trong dây được thể hiện trên đồ thị hình 9 cũng cho thấy, ở cùng điều kiện phụ tải như nhau, khi tốc độ chuyển động của không khí xung quanh dây tăng lên thì mức nhiệt độ trong dây giảm xuống. Kết quả tính toán với dòng điện chạy qua dây cáp có thông số tính toán như trong bảng 1 và nhiệt độ không khí bằng 30°C thì khi tốc độ không khí tăng từ 0,5m/s lên 2m/s, nhiệt độ cực đại trong dây sẽ giảm từ 37,45°C xuống còn 33,94°C, tức mức giảm nhiệt độ của dây là 3,52°C. Mức giảm nhiệt độ này là do khi tăng tốc độ chuyển động của không khí thì cường độ trao đổi nhiệt giữa bề mặt lớp vỏ và môi trường tăng lên làm tăng sự thoát nhiệt trong dây cáp ra môi trường qua bề mặt vỏ. Từ những kết quả thu được ở trên cho thấy, ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ chuyển động của không khí xung quanh dây đến sự biến thiên nhiệt độ trong dây là rất đáng kể. Vì vậy, khi tính toán thiết kế dây cáp cho hệ thống truyền tải điện năng nhất thiết phải kể đến ảnh hưởng của điều kiện môi trường xung quanh dây.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phân tích cơ chế truyền nhiệt trong dây cáp khi có phụ tải thay đổi, bằng cách chia dây theo phương bán kính thành các phần tử có kích thước đủ nhỏ và tiến hành thiết lập phương trình cân bằng nhiệt cho các phần tử, thu được mô hình toán học xác định quy luật phân bố nhiệt độ trong dây cáp với bất kỳ sự thay đổi nào của phụ tải. Đây là kết quả mới về khoa học và có thể ứng dụng để tính toán, thiết kế, kiểm tra dây cáp cho hệ thống truyền tải điện năng.

Từ kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của lớp dẫn điện đến sự biến thiên nhiệt độ trong dây cáp, thấy rằng, các dây cáp có cùng điều kiện về kích thước hình học và cùng điều kiện môi trường tỏa nhiệt thì với dây cáp có điện trở suất của lớp dẫn điện càng lớn, dòng điện định mức chạy qua dây sẽ càng nhỏ. Kết quả nghiên cứu này cho phép tính toán, lựa chọn dây cáp sử dụng các loại vật liệu dẫn điện khác nhau cho hệ thống truyền tải điện năng.

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ không khí đến sự phân bố nhiệt độ trong dây cho thấy, ảnh hưởng này là rất đáng kể. Với một loại dây cáp xác định và ở cùng phụ tải như nhau, nếu nhiệt độ không khí xung quanh dây tăng lên hoặc tốc độ không khí giảm xuống thì nhiệt độ trong dây cáp sẽ tăng lên. Vì vậy, khi tính toán thiết kế dây cáp cho hệ thống truyền tải điện năng nhất thiết phải tính đến ảnh hưởng của điều kiện môi trường xung quanh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Dang Quoc Phu, Tran The Son, Tran Van Phu, *Heat Transfer*. Vietnam Education Publishing House, Hanoi, 2004. (in Vietnamese)
- [2]. Le Trong Vinh, *Giao trình giải tích số*. Science and Technics Publishing House, Hanoi, 2017.
- [3]. Nguyen Dang Khoat, "Investigating the process of heat transfer in electrical cables of power transmission system," *Hanoi University of Industry Journal of Science and Technology*, 59, 6C, 72-77, 2023
- [4]. Circular No. 39/2015/TT-BCT dated November 18, 2015 of Minister of Industry and Trade on Electricity Distribution System. Hanoi, Vietnam.
- [5]. Adrian Bejan, Allan D. Kraus, *Heat transfer handbook*. John Willey & Sons, USA, 2003. ISBN 0-471-39015-1
- [6]. Bustamante S., Mínguez R., Arroyo A., Manana M., Laso A., Castro P., Martínez R., "Thermal behaviour of medium-voltage underground cables under high-load operating conditions," *Appl. Therm. Eng.*, 156, 444-452, 2019.
- [7]. Eckert E. R. G., R. M. Drake, *Analysis of Heat and Mass Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [8]. Fand R. M., "Heat Transfer by Forced Convection from a Cylinder to Water in Crossflow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8, 995, 1965.
- [9]. Holman J. P., *Heat Transfer*. Tenth Edition, McGraw - Hill, New York, 2010.
- [10]. Haskew Tim A., Carwile Regina F., Grigsby L. L., "An Algorithm for Steady State Thermal Analysis of Electrical Cables with Radiation by reduced Newton-Raphson Techniques," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 1, 1994.
- [11]. M. H. Shwehdi, M. A. Morsy, A. Abugurain, "Thermal aging tests on XLPE and PVC cable insulation materials of Saudi Arabia," In *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 176-180, 2003.
- [12]. Neher J.H., McGrath, M.H., "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus and Systems*, 76, 752-772, 1957.
- [13]. Shekhar A., Feng X., Hebner R., Gattozzi A., Strank S., Mor A., Ramirez-Elizondo L., Bauer P., "Thermal modelling and experimental validation for research on medium voltage DC cables," In *Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, USA, 1-5, 2017
- [14]. Tkachenko V.A., Kropotin O.V., Shepelev A.O., Kropotin V.O., "Mathematical model of cable power line with XLPE insulation with underground installation," *Omsk Sci. Bull.*, 137-141, 2018.
- [15]. Yang L., Qiu W., Huang J., Hao Y., Fu M., Hou S., Li L., "Comparison of Conductor-Temperature Calculations Based on Different Radial-Position-Temperature Detections for High-Voltage Power Cable," *Energies*, 11, 117, 2018.

AUTHOR INFORMATION**Nguyen Dang Khoat**

Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications, Vietnam