

Arbeitsökonomik
und Arbeitsschutz
G (1) 65 - 71 (1962)

Glaser
This has
been translated

Fragen des Arbeitsschutzes bei der Arbeit an Hoch- und Höchstfrequenzanlagen

Von Valentin Franke und Olga Ushinskaja

In den Industriebetrieben und wissenschaftlichen Forschungsinstitutionen wird eine Vielzahl von Arbeiten ausgeführt, die den Aufenthalt der Menschen im elektromagnetischen Hoch- und Höchstfrequenzfeld bedingen. Das ist der Fall sowohl beim Betrieb der Industrieanlagen, wie z. B. der elektrothermischen Anlagen als auch bei der Entwicklung und Herstellung von funktechnischen, Fernseh- und anderen Geräten. Durch eine Reihe von Forschungen hat man festgestellt, daß die elektromagnetischen Felder von bestimmter Intensität auf den menschlichen Organismus eine ungünstige Wirkung ausüben können. Um ähnliche Einwirkungen zu vermeiden, müssen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Außerdem muß man in Betracht ziehen, daß in den Hoch- und Höchstfrequenzgeneratoren Spannungen mit einer Frequenz von 50 Hz und Gleichstrom verwendet werden. Das Arbeiten an solchen Anlagen muß unter Beachtung der elektrosicherheitstechnischen Vorschriften für Hochspannungsanlagen verrichtet werden, was jedoch in vorliegendem Artikel nicht näher betrachtet werden soll.

Weit verbreitet ist die Meinung, daß sogar eine geringe Erhöhung der Frequenz über 50 Hz, z. B. auf 200 Hz, die Gefahr eines Traumas durch elektrische Stromeinwirkung bedeutend verringert. Diese Meinung beruht auf den Versuchsergebnissen bei Hunden mit tödlicher Wirkung.

Jedoch bei der Einschätzung der Sicherheitsbedingungen ist es richtiger, nicht von der tödlichen Wirkung, sondern vom Grenzwert des Stromes durch den Organismus auszugehen, bei dem der Mensch noch in der Lage ist, den Krampf zu überwinden und sich selbständig von den stromleitenden Teilen loszureißen. Diesen Strom kann man als „höchstzulässig“ bezeichnen. Die Beobachtungen am Menschen, die im Leningrader Institut für Arbeitsschutzforschung auf dem Gebiet der Bewegungsreaktion durchgeführt wurden, brachten andere Ergebnisse als die oben erwähnten Versuche bei den Hunden.

Die Ergebnisse der Beobachtungen bei Menschen sind aus der Abb. 1 ersichtlich. Auf der Ordinate ist in dieser Zeichnung das Verhältnis des Stromes der betreffenden Frequenz (J_f) zum Strom der Frequenz 50 Hz (J_{50}) aufgetragen, der die gleiche motorische Reaktion hervorruft. Die Stromstärke, bei der sich in bezug auf die Kraft gleiche motorische Reaktion beim Menschen ergibt, ändert sich wenig bei den Frequenzen von 50 ... 2000 Hz. Die Ströme bei einer Frequenz von 2000 Hz rufen etwa dieselbe Muskelreaktion hervor, wie bei 50 Hz. Bei höheren Frequenzen benötigt man größeren Strom, um eine Reaktion von gleicher Kraft zu erzielen. Bei 10 000 Hz ist dieser Strom um das Dreifache höher als bei 50 Hz. Wenn man annimmt, daß der „höchstzulässige Strom“ bei 50 Hz 10 ... 15 mA ist, so beträgt er bei 10 000 Hz 30 ... 45 mA. Man hat festgestellt, daß sogar bei Frequenzen von mehreren Zehntausend Hertz, bei einer gewissen Größe des Stromes, Muskelreaktion entsteht.

Mit der Zunahme der Frequenz nimmt die Muskelreaktion ab und bei Frequenzen von 70 000 Hz und mehr dominiert die Wärmewirkung des Stromes gegenüber der Muskelreaktion. Wenn man das Erwähnte berücksichtigt, ist es notwendig, die stromleitenden Teile der Hochfrequenzanlagen *abzuschirmen*, nicht nur um Brandverletzungen zu vermeiden, sondern auch um mögliche

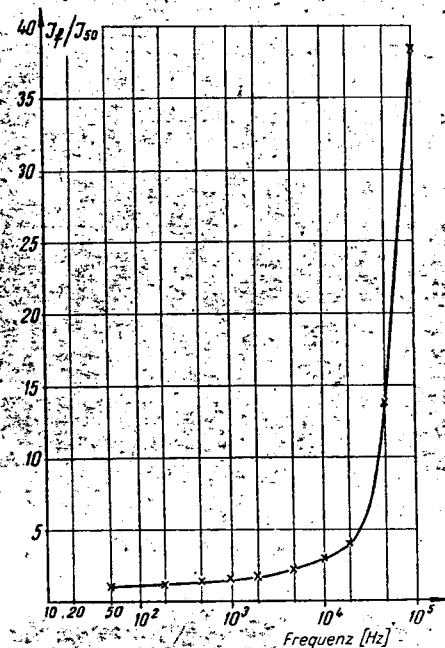


Abb. 1

elektrische Schläge im unteren Hochfrequenzbereich zu verhüten. Offene stromleitende Teile sollen sich nicht unter einem Strom befinden, der den zulässigen übersteigt.

Der Grad der biologischen Wirkung des Feldes auf den Menschen ist von der Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen und von der Intensität des Feldes am Arbeitsplatz abhängig.

In jedem Punkt des Raumes kennzeichnet sich diese Intensität durch die elektrische- und Magnetfeldstärke (E und H). Im technischen System der Einheiten werden die genannten Größen entsprechend in Volt pro Meter und Ampere pro Meter gemessen. Man muß berücksichtigen, daß sich bei der Veränderung des Abstandes von der Strahlungsquelle nicht nur die Intensität des Feldes ändert, sondern auch eine Reihe von Eigenschaften des letzteren. In den Abständen beispielsweise, die $\lambda/2\pi$ bedeutend übersteigen (in der sogenannten Wellenzone) besteht das Feld in der Form von stehenden sphärischen Wellen und zwischen den Größen E und H hat man die universale Abhängigkeit $E = 377 H$. In dieser Zone kann man die Intensität des Feldes nicht nur durch die Größen

¹ Mit dem Buchstaben λ bezeichnet man die Wellenlänge der elektromagnetischen Schwingungen. $\pi = 3,14$.

E und H, sondern auch durch die Dichte des Leistungsflusses σ (Poyntingscher Vektor) kennzeichnen, die mit E und H durch das Verhältnis $\sigma = \frac{E^2}{377} = 377 H^2$ verbunden ist.

Im technischen System der Einheiten wird die Größe σ in Watt pro Quadratmeter gemessen. Die Feldstärke verringert sich in der Wellenzone umgekehrt proportional der ersten Potenz des Abstandes von der Strahlungsquelle.

In den Abständen vor der Quelle, kleiner als $\lambda/2\pi$ (in der sogenannten Induktionszone) kann man das Feld nicht als sphärische Welle betrachten. Hier fehlt die universale Abhängigkeit zwischen den Größen E und H, und von dem Begriff der Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor) kann man überhaupt nicht Gebrauch machen. Als technische Daten der Intensität des Feldes in der Induktionszone muß man gleichzeitig beide Werte E und H angeben. In dieser Zone hängt das Verhältnis zwischen E und H von der Eigenart der Quelle des Feldes ab. Insbesondere in der Nähe der Spulen, die vom Hochfrequenzstrom durchflossen werden, dominiert das Magnetfeld gegenüber dem elektrischen ($E \ll 377 H$), aber in der Nähe der Kondensatoren dominiert das elektrische Feld gegenüber dem magnetischen ($E \gg 377 H$). Das erste trifft zu z. B. bei Anlagen für Metallschmelzen und -härten, wo die Induktionsspulen Arbeitselemente sind, das zweite bei Anlagen zum Erhitzen der Dielektriken und Halbleiter, da dieser Prozeß zwischen den Kondensatorplatten durchgeführt wird. In der Induktionszone sinkt die Feldstärke mit der Entfernung von der Strahlungsquelle schnell, und zwar umgekehrt proportional dem Kubus oder Quadrat des Abstandes (in Abhängigkeit von der Richtung). Die Messungen zeigen, daß in unmittelbarer Nähe von den Hochfrequenzanlagen der industriellen Erhitzung bei einer Leistung von einigen Dutzenden Kilowatt bei schlechter Abschirmung die elektrische Feldstärke tausend Volt pro Meter und die Magnetfeldstärke Hunderte von Ampere pro Meter erreichen kann.

Bei der Wahl von technischen Daten der Intensität des Feldes in verschiedenen Frequenzbereichen muß man berücksichtigen, daß der Mensch, der bei Wellenlängen von unter einem Meter (Frequenz über 300 MHz) an einer Anlage arbeitet, sich praktisch in der Wellenzone befindet, aber bei längeren Wellen in der Induktionszone. Deshalb benutzt man bei Höchstfrequenzen als technische Daten (Charakteristikum) der Intensität des Feldes in der Praxis der hygienischen Bewertung die Größe σ . Bei Frequenzen unter 300 MHz muß man die Intensität des Feldes mit den Größen E und H charakterisieren.

Die Einwirkung des Elektromagnetfeldes auf den Menschen äußert sich in Funktionsstörungen des Nervensystems.

Subjektiv äußert sich das in der erhöhten Ermüdung, in Kopfschmerzen u. ä. Alle diese Symptome vergehen gewöhnlich nach der Unterbrechung der Einwirkung des Elektromagnetfeldes.

Im Bereich der Höchstfrequenzen (Dezimeter- und Zentimeterwellen) stellt man Augenverletzungen (irreversible Augenlinsenverletzungen durch Wärme, die eine Trübung zur Folge haben) fest. Bei niedrigeren Frequenzen (Dutzenden von Megahertz und weniger) sind Verletzungen (Trauma) nicht festgestellt worden. Bei sehr hoher Intensität des Hochfrequenzfeldes kann man Verletzungen der inneren Organe durch Wärme erwarten. Ähnliche Fälle sind in der Literatur wenig behandelt worden und sie gibt es nur bei der Arbeit mit starker Ausstrahlung.

In Verbindung mit dem Obenerwähnten werden in der UdSSR höchstzulässige Normen der Intensität des Feldes in Produktionsräumen ausgearbeitet. Heute gelten bereits folgende provisorischen Normen der Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor) für den Zentimeter- und Dezimeterwellenbereich ($\lambda = 1 \dots 100 \text{ cm}$): bei Bestrahlung im Laufe des ganzen Arbeitstages bis $10 \frac{\mu \text{ W}}{\text{cm}^2}$,

bei Bestrahlung von höchstens zwei Stunden am Tage bis $100 \frac{\mu \text{ W}}{\text{cm}^2}$, bei Bestrahlung von höchstens 15 ... 20 Minuten am Tage mit obligatorischem Schutzbrillentragen bis $1000 \frac{\mu \text{ W}}{\text{cm}^2}$.

Im Fall von Impulsschwingungen gehören die angeführten Normen zur mittleren zeitlichen Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor).

Außer den genannten Normen gibt es eine provisorische Norm der elektrischen Feldstärke für den Lang- und Mittelwellenbereich (Frequenz unter 1,5 MHz). Diese Norm ist gleich 5 V/m. Als Ausnahme ist am Arbeitsplatz in der Nähe von Schmelz- und Härteinduktoren eine Feldstärke von 10 V/m zulässig. Gegenwärtig werden die Normen für den Lang- und Mittelwellenbereich überprüft. Das hängt damit zusammen, daß im betreffenden Bereich, wie schon erwähnt, die Intensität des Feldes durch zwei Größen (E und H) charakterisiert wird. Deshalb muß man nicht nur die Größe E, sondern auch die Größe H normen. Darüber hinaus dominiert in der Nähe der Schmelz- und Härteanlagen das Magnetfeld gegenüber dem elektrischen. Die Einführung der speziellen Norm für H ermöglicht scheinbar die Norm für E zu erhöhen, sofern gegenwärtig die Normung der Größe E gleichzeitig zur indirekten Begrenzung der Größe H dient. Für den Bereich der Zwischen-, Kurz- und Meterwellen ($\lambda = 1 \dots 200 \text{ m}$) erfolgt die Ausarbeitung der Normen.

Bei der Durchführung der genannten Arbeiten auf dem Gebiet der Normung ist es notwendig, den Vergleichsgrad der Einwirkung der verschiedenen Fre-

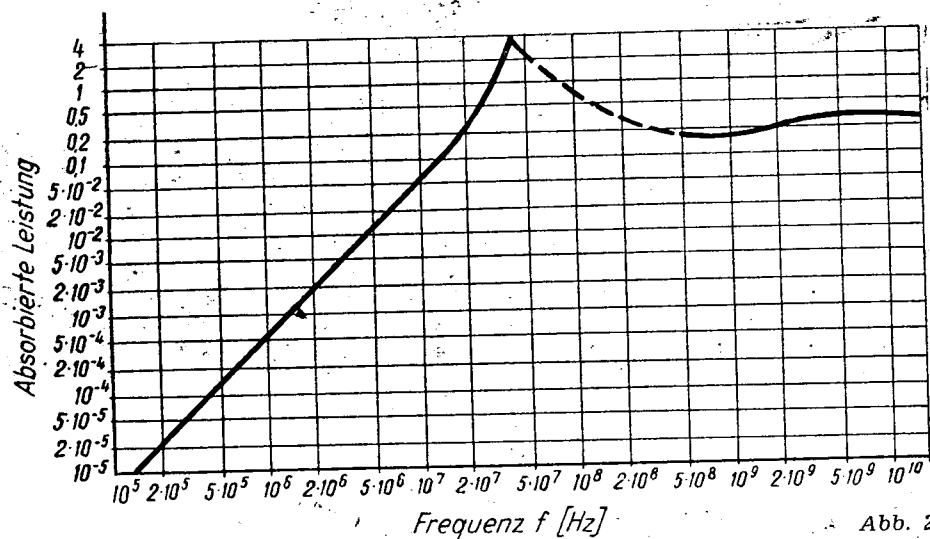


Abb. 2

quenzfelder auf den Menschen zu kennen. Das dafür notwendige experimentelle Material wird gegenwärtig gesammelt. Um in der betreffenden Frage eine vorläufige Orientierung zu erzielen, wurde im Leningrader Institut für Arbeitsschutzforschung eine Berechnung der Vergleichsabsorption der elektromagnetischen Energie durch Modelle des menschlichen Körpers in verschiedenen Frequenzbereichen bei ein und derselben Intensität des Feldes durchgeführt. Es wurden Modelle untersucht, die die Form eines Zylinders und Rotationsellipsoids haben und auf verschiedene Art im Felde orientiert waren. Man nahm an, daß das Modellmaterial elektrische Parameter des Muskelgewebes besitzt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Form einer graphischen Darstellung in Abb. 2 dargestellt. Auf beiden Achsen benutzt man den logarithmischen Maßstab. Aus der Kurve ist ersichtlich, daß mit der Erhöhung der Frequenz auf einige Dutzend Megahertz die Absorption der Energie sich proportional dem Quadrat der Frequenz vergrößert. Im Bereich der Meterwellen beobachtet man Resonanzmaxima der Absorption. In der graphischen Darstellung sind diese Maxima nicht gezeigt, aber ihr allgemeiner Verlauf ist gestrichelt angedeutet. Bei der weiteren Erhöhung der Frequenz sinkt die Absorption anfangs ein wenig, aber danach wird sie konstant. Die dargestellte Kurve ermöglicht orientierungsweise die Vergleichsstärke der Einwirkung verschiedener Frequenzfelder auf den Organismus zu beurteilen.

Es ist jedoch zu betonen, daß man sich zu den Schlußfolgerungen, die auf diesem Wege erzielt worden sind, vorsichtig verhalten und diese Schlußfolgerungen durch biologische Untersuchungen überprüfen muß. Die Absorption gleicher Mengen Energie verschiedener Frequenzen durch den menschlichen Körper kann zu ungleichen biologischen Effekten (Wirkungen) durch das Spezifikum der Wirkung des Feldes verschiedener Frequenzen auf verschiedene Organe führen. Aus der Kurve kann man entnehmen, daß besondere Aufmerksamkeit der Ausarbeitung von Normen für den Meterwellenbereich geschenkt werden muß, da dort die Absorption der Energie maximal ist. Vor dem Abschluß dieser Ausarbeitung müssen im Meterbereich Normen beachtet werden, die für Zentimeter- und Dezimeterwellen festgelegt sind. Dabei muß man damit

rechnen, daß der Wert $\sigma = 10 \frac{\mu \text{ W}}{\text{cm}^2}$ der Größe E, gleich 6 V/m entspricht. Aus

der Kurve ist ebenso ersichtlich, daß im Hochfrequenzbereich (100 kHz ... 30 MHz), die Norm von der Frequenz abhängt und je nach Erhöhung der letzteren abnehmen muß.

Außer der erwähnten Berechnung wurde im Leningrader Institut für Arbeitsschutzforschung und in anderen Institutionen eine theoretische Einschätzung der Vergleichsabsorption der Energie mit Modellen des menschlichen Körpers getrennt im elektrischen und Magnetfeld im Bereich von Lang- und Mittelwellen durchgeführt. Die Berechnung zeigte, daß in der Nähe der Induktionsspulen zum großen Teil die Energie des Magnetfeldes durch den Organismus absorbiert wird. Damit bestätigt sich die obengenannte Bemerkung über die Notwendigkeit der Normung im betreffenden Bereich nicht nur für die Größe E, sondern auch für die Größe H.

Die Kontrolle über die Einhaltung der Normen wird mit Hilfe spezieller Geräte durchgeführt, die es ermöglichen, in Produktionsräumen die Größen E und H bei Frequenzen bis 300 MHz und die mittlere Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor) σ bei höheren Frequenzen zu messen.

Im Leningrader Institut für Arbeitsschutzforschung ist ein Gerät Typ IEMP -1² entwickelt worden, das es ermöglicht, die Größe E bei Frequenzen von 100 kHz ... 300 MHz im Bereich von 3 ... 1500 V/m und die Größe H bei Frequenzen von 100 kHz ... 1,5 MHz in den Bereichen von 0,5 ... 300 A/m zu messen.

Zur Messung der Größe E benutzt man im Gerät einen kleinen Dipol, zur Messung der Größe H eine Rahmenantenne. Die Spannung, die in der Antenne entsteht, wird von einem Kristalldetektor gleichgerichtet, danach verstärkt und gemessen. Die Abweichung des Gerätes beträgt 25 %. Die Anwendung von Geräten mit geringerer Abweichung zur Messung in der Induktionszone ist unzweckmäßig, da sich in dieser Zone die Feldstärke dermaßen schnell in Abhängigkeit vom Abstand zur Strahlungsquelle ändert, daß genauere Messungen praktisch ihren Sinn verlieren.

Für die Messung der mittleren Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor) bei Frequenzen über 300 MHz können Thermistorleistungsmesser angewendet werden. Diese Geräte müssen mit Antennen mit einer gewissen wirksam absorbierenden Oberfläche versehen sein. Indem man die mit dem Gerät gemessene Leistung durch die Größe dieser Oberfläche teilt und die Leistungsverluste auf dem Wege von der Antenne zum Gerät in Betracht zieht, kann man die Größe σ ermitteln.

Gegenwärtig wird in der UdSSR die Auslieferung eines Universalmessers für die Dichte des Leistungsflusses (Poyntingscher Vektor) für einen größeren Frequenzbereich, der speziell für Zwecke der Hygiene vorgesehen ist, vorbereitet.

Der Schutz der Menschen, die die Hochfrequenz- und Höchstfrequenzanlagen bedienen, wird in der UdSSR in Übereinstimmung mit den gültigen sanitären Vorschriften verwirklicht.

Eine der Hauptschutzmaßnahmen für die Arbeitenden vor der Einwirkung des elektromagnetischen Feldes ist die Abschirmung der Hochfrequenz- und Höchstfrequenzanlagen, d. h. Einschließen dieser Anlagen in geschlossene Metallgehäuse. Bei der Durchführung des Abschirmens der Hochfrequenzanlagen muß man neben den hygienischen Erfordernissen auch die Anforderungen bezüglich der Rundfunkstörungen beachten. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden die Hochfrequenzanlagen des öfteren in abgeschirmten Zimmern untergebracht. Vom Standpunkt der Hygiene ist eine solche Lösung annehmbar, wenn im abgeschirmten Zimmer keine Menschen sind und die Steuerung der Anlagen automatisiert ist. Sind aber Menschen in einem derartigen Raum anwesend, dann werden sie der Einwirkung des Feldes ausgesetzt sein. Um das zu vermeiden, ist es notwendig, alle strahlenden Elemente der Hoch- und Höchstfrequenzanlagen unmittelbar abzuschirmen.

Dabei entstehen Schwierigkeiten, hauptsächlich im Falle der Abschirmung der Spulen, die von einem starken Hochfrequenzstrom durchflossen werden (z. B. der Schmelz- und Härteinduktoren, Hochfrequenztransformatoren). In der Nähe der Spulen kann der Schirm erhitzt werden, was zu bedeutenden Energieverlusten führt. Die Erfahrungen einer Reihe von Betrieben zeigen, daß die genügende Abschirmung der Spulen mit Hilfe von Kupfer- und Aluminiumblechen realisiert werden kann. Stahl, der ferromagnetische Eigenschaften besitzt, ist dafür ungeeignet. Der Abstand von der Spule zum Schirm muß genügend groß sein (Durchmesser der Spule).

Im Leningrader Institut für Arbeitsschutzforschung ist eine Methode zur Berechnung der Schirme für Induktionsspulen ausgearbeitet worden. Das Ab-

schirmen der übrigen Elemente der Hochfrequenz- und Höchstfrequenzanlagen ruft keine Schwierigkeiten hervor. Diese Schirme können aus Stahlblechen, aber auch aus Kupfer- oder Messingnetz hergestellt werden.

Die Stärke der kompakten Metallbleche wird durch die Bedingungen der mechanischen Festigkeit bestimmt. Die Fugen zwischen den Blechen müssen einen zuverlässigen elektrischen Kontakt gewährleisten (Schweißen, Löten). Die Schirme der einzelnen Elemente der Anlage müssen untereinander auf dem gesamten Umfang verbunden sein. Abnehmbare und sich öffnende Teile des Schirmes müssen einen zuverlässigen Kontakt mit seinem unbeweglichen Teil haben.

Beim Einstellen und Regulieren der Hochfrequenz- und Höchstfrequenzanlagen ist es notwendig, die Arbeiten, welche die Abnahme der Schirme erfordern, auf das Minimum zu kürzen und nach Möglichkeit, bei verminderter Leistung durchzuführen.

Außer dem Dargelegten kann man noch folgende Schutzmaßnahmen vor dem elektromagnetischen Feld vorschlagen:

- a) Einstellen und Regulieren der Generatoren ist ohne Strahlung von Energie in den freien Raum durchzuführen, sie ist im Belastungswiderstand zu verrichten.
- b) Die Arbeitsplätze müssen nach Möglichkeit von den Quellen des Feldes entfernt sein.

Übersetzt von Boris Käärrik

Bearbeitet von Herbert Hartig und Rudolf Kupke

Anschriften der Verfasser:

Valentin Franke, Dipl.-Ingenieur, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitsschutzforschung in Leningrad, Uliza Furmanowa 3.

Olga Ushinskaja, Dipl.-Ingenieur, Leiterin des Laboratoriums für Elektrosicherheit am Institut für Arbeitsschutzforschung in Leningrad, Uliza Furmanowa 3.

² Russisch: ИЭМП-1.