

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Rotating electrical machines – Test methods and apparatus for the measurement of the operational characteristics of brushes

Machines électriques tournantes – Méthodes d'essai et appareils pour le mesurage des caractéristiques opérationnelles des balais

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2021 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC online collection - oc.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 18 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC online collection - oc.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Rotating electrical machines – Test methods and apparatus for the measurement of the operational characteristics of brushes

Machines électriques tournantes – Méthodes d'essai et appareils pour le mesurage des caractéristiques opérationnelles des balais

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.10

ISBN 978-2-8322-9656-1

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms.....	8
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Symbols.....	15
3.2.1 Symbols and units	15
3.2.2 Subscripts	16
3.3 Abbreviated terms.....	17
4 Test rig specification.....	18
4.1 Common specification.....	18
4.1.1 General	18
4.1.2 Rings.....	18
4.1.3 Brushes	19
4.1.4 Brush holders	19
4.1.5 Power supply	21
4.1.6 Instrumentation.....	21
4.2 Test rig specification for commutators.....	31
4.2.1 General	31
4.2.2 Test rings	31
4.2.3 Brushes arrangement	34
4.2.4 Special brush for voltage drop measurement	35
4.3 Test rig specification for slip rings.....	36
4.3.1 General	36
4.3.2 Ring.....	36
4.3.3 Brushes	38
4.3.4 Configuration for DC and AC operation	38
5 Test schedule and operating conditions	40
5.1 General.....	40
5.2 Environmental conditions	41
5.2.1 Laboratory environment.....	41
5.2.2 Ambient air temperature and ring surface temperature.....	41
5.2.3 Ambient humidity	41
5.3 Operating conditions	41
5.4 Test preparation and inspection	42
5.4.1 General	42
5.4.2 Test rig	42
5.4.3 Brush-holders	42
5.4.4 Test brushes.....	42
5.4.5 Ring roughness	42
5.4.6 Brush bedding	43
5.4.7 Brushes measurement.....	43
5.5 Test sequence	43
5.5.1 Test starting	43
5.5.2 Test duration	43
5.6 Measurements and observations.....	43
5.6.1 General	43

5.6.2	Interval between measurements	44
5.6.3	Before starting a test sequence	44
5.6.4	Measurements during a test sequence	45
5.6.5	Measurements after a test sequence	45
6	Determination of friction coefficient	45
6.1	General	45
6.2	Test conditions	46
6.3	Measurements	46
6.3.1	General	46
6.3.2	Test rig arrangement of Method a)	46
6.3.3	Test rig arrangement of Method b)	46
6.4	Calculation of friction coefficient	46
6.4.1	Test rig arrangement of Method a)	46
6.4.2	Test rig arrangement of Method b)	47
6.5	Report	47
7	Determination of voltage drop	48
7.1	General	48
7.2	Test conditions	49
7.3	Measurements	49
7.3.1	General	49
7.3.2	Brush total voltage drop U_B	49
7.3.3	Brush contact voltage drop U_C	49
7.4	Calculation	50
7.4.1	Brush total voltage drop U_B	50
7.4.2	Brush contact voltage drop U_C	50
7.5	Report	51
8	Determination of brush wear	52
8.1	General	52
8.2	Test conditions	52
8.3	Measurements	52
8.4	Calculation of brush wear	53
8.5	Report	54
9	Determination of commutation ability of brush grades by a specific black-band test on a DC machine	54
9.1	General	54
9.2	Set-up	55
9.3	Test procedure	58
9.3.1	Preparation of the test	58
9.3.2	Operating conditions and test sequence	58
9.4	Black-band graph	59
9.5	Interpretation	60
9.5.1	General	60
9.5.2	Influence of commutator skin thickness on the black-band zone	61
9.5.3	Influence of brush contact resistance	62
9.5.4	Estimation of mechanical contact stability deviation by comparing the black-band figures before and after longtime critical operation	64
Annex A (informative)	Additional information for friction coefficient measurement	67
A.1	Details of calculation of friction coefficient by using method a) of 4.1.6.1.2	67

A.2	Adjustment of strain sensor for calculation of friction coefficient by using method b) of 4.1.6.1.3	68
A.2.1	General	68
A.2.2	Correlation between output voltage and load	68
A.2.3	Correlation between friction coefficient and load	68
Annex B (informative)	Black-band zone deviation cases	71
B.1	Black-band zone in case of limited contact area	71
B.2	Influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone	72
B.3	Black-band zone hysteresis between increased I_a and decreased I_a	73
Annex C (informative)	Test report example	75
Bibliography		77
Figure 1	– Profile and determination of height of profile elements	9
Figure 2	– Forces acting on a brush	12
Figure 3	– Voltage drops in a brush when in operation	12
Figure 4	– Brush holder configuration	20
Figure 5	– Measurement of the mechanical torque by Method a)	22
Figure 6	– Brush test machine for Method b)	23
Figure 7	– Test rig arrangement with a load cell	24
Figure 8	– Brush contact probe application point for U_C	27
Figure 9	– Thermocouples insertion position	28
Figure 10	– Evaluation of contact temperature θ_C by interpolation	29
Figure 11	– Illustration of bar grooves dimensions and preparation	32
Figure 12	– Brush covering	34
Figure 13	– Brushes configuration	35
Figure 14	– Control brush arrangement	36
Figure 15	– Characteristics of grooves	37
Figure 16	– Test rig arrangement for DC operation with 2 brushes per polarity	39
Figure 17	– Test rig arrangement for AC operation with 2 brushes	40
Figure 18	– Example of friction coefficient μ graph as a function of peripheral speed v_p	48
Figure 19	– Example of brush total voltage drop U_B graph as a function of current density J_B	52
Figure 20	– Example of brush wear rate WR_i of brushes during the test for a test rig with 4 brushes	53
Figure 21	– Black-band test circuit configuration using DC generator and resistance load 56	56
Figure 22	– Black-band test circuit configuration for Brondell's loading-back method	57
Figure 23	– Determination of black-band zone for a specified constant speed of rotation	60
Figure 24	– Influence of commutator film thickness on the black-band zone	62
Figure 25	– Comparison of black-bands for a high contact resistance brush and a low contact resistance brush in case of a motor	63
Figure 26	– Comparison of black-bands for a high contact resistance brush and a low contact resistance brush in case of a generator	64

Figure 27 – Black-band figure deviation of before and after the critical operation of repetitive peak load application of 225 %, for a "strong" grade	65
Figure 28 – Black-band figure deviation of before and after the critical operation of repetitive peak load application of 225 %, for a "weak" grade	66
Figure A.1 – Correlation of load cell output voltage U_{IC} with mass m	68
Figure A.2 – Example of correlation between load and friction coefficient μ	69
Figure B.1 – Limited contact area and reduction of tangential dimension at contact	71
Figure B.2 – Black-band zone in case of a limited contact area	72
Figure B.3 – Influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone	73
Figure B.4 – Black-band zone hysteresis between increasing I_{arm} and decreasing I_{arm}	74
Table 1 – Dimensions of test brushes	19
Table 2 – Test conditions	42

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES – TEST METHODS AND APPARATUS FOR THE MEASUREMENT OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF BRUSHES

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International standard IEC 60773 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1983. It constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- The clause structure has been modified on the view point of a laboratory testing procedure. The new sequence is as follows: test rig specification (Clause 4), general testing procedure (Clause 5), and specific procedure for each operational characteristic (Clauses 6 to 8).
- A new Clause 9 has been added to introduce the black-band test for the characterisation of the brush grades for DC machines.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
2/2045/FDIS	2/2050/RVD

Full information on the voting for the approval of this International Standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021

ROTATING ELECTRICAL MACHINES – TEST METHODS AND APPARATUS FOR THE MEASUREMENT OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF BRUSHES

1 Scope

This document applies to test methods for the measurement of the operational characteristics of brushes designed to operate on commutating and slip ring machines under specified test conditions.

By extension some tests may be relevant for other kinds of sliding electrical contacts for electrical appliances.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60034-19:2014, *Rotating electrical machines – Part 19: Specific test methods for d.c. machines on conventional and rectifier-fed supplies*

IEC 60136, *Dimensions of brushes and brush-holders for electrical machinery*

IEC 60276:2018, *Carbon brushes, brush holders, commutators and slip-rings – Definitions and nomenclature*

IEC 60356, *Dimensions for commutators and slip-rings*

IEC 60584-1:2013, *Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances*

IEC 60751:2008, *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*

IEC TR 61015, *Brush-holders for electrical machines. Guide to the measurement of the static thrust applied to brushes*

ISO 1190-1:1982, *Copper and copper alloys – code of designation – Part 1: Designation of materials*

ISO 3274:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*

ISO 15510:2014, *Stainless steels – Chemical composition*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1 Terms and definitions

3.1.1

run-out

runout

inaccuracy of the rotating system, measured on the surface of the ring while turning

Note 1 to entry: This includes out-of-round (that is, lacking sufficient roundness); eccentricity (that is, lacking sufficient concentricity); or axial bending (regardless of whether the surfaces are perfectly round and concentric at every cross-sectional point).

3.1.2

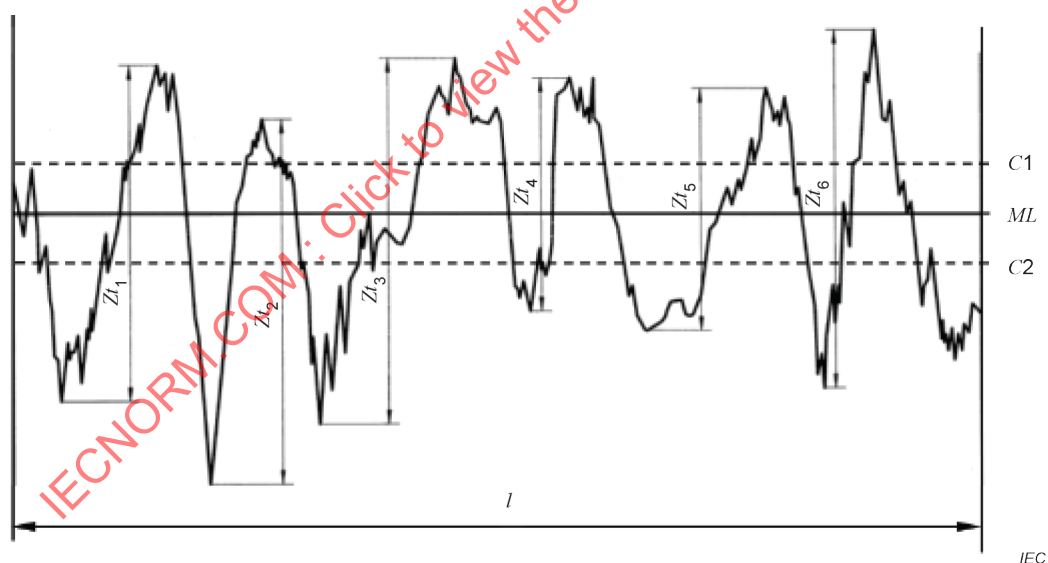
roughness

R_a

arithmetic mean of the absolute ordinate value $Z(x)$ of a profile within a sampling length l

$$R_a = \frac{1}{l} \times \int_0^l |Z(x)| \cdot dx$$

Example: Figure 1 shows an example of profile.



Key

Z_{i_i}	height of profile element i
l	sampling length
ML	mean line
$C1$ and $C2$	upper and lower intersection lines (respectively)

Figure 1 – Profile and determination of height of profile elements

[SOURCE: ISO 4287:1997, Figure 9]

3.1.3

peak count

RP_c

number of profile elements per centimeter of sampling length which exceed the upper intersection line $C1$ and fall short of the lower intersection line $C2$

Note 1 to entry: Both intersection lines are parallel to the diagram mean line (see Figure 1).

[SOURCE: ISO 4287/A1:2009, 4.3.2]

3.1.4

abrasive stone

material used to grind a surface

Note 1 to entry: The quality of the material and the method of appliance depend on its use. Therefore, for the purpose of this document, definitions 3.1.5, 3.1.7 and 3.1.8 are used.

3.1.5

grinding stone

abrasive stone used to grind the test ring

Note 1 to entry: It is generally made of hard abrasive grains.

3.1.6

brush fitting

operation at the end of which the brush contact surface is matching the ring profile

3.1.7

fitting stone

abrasive stone used for fitting the brush to the commutator/ring

3.1.8

roughness stone

abrasive stone used to obtain the proper range of roughness to the test ring, generally made of soft abrasive grain

3.1.9

brush contact area

S

area of the brush in contact with the ring surface

Note 1 to entry: When radial brush is used the brush contact surface area S_r is the cross-section of the brush:

$$S = t \times a \quad (1)$$

where t and a are respectively the tangential and axial dimensions of the brush.

When inclined brush is used the bottom angle is part of the formula giving the brush contact surface area S_α :

$$S_\alpha = \frac{t \times a}{\cos \alpha} \quad (2)$$

where α is the contact angle (or bottom angle).

3.1.10

brush specific pressure

p

force per contact area of the brush, given by formula (3):

$$p = \frac{F_p}{S} \quad (3)$$

where F_p is the force applied by the pressure system;

and S is the brush contact surface area

Note 1 to entry: When F_p is expressed in grams force (gf) and brush contact surface in cm^2 the calculated specific pressure is in gf/cm^2 . To convert into SI units: the result in gf/cm^2 multiplied by 98,07 gives p in N/m^2 (98,07 is the gravitational acceleration in m/s^2 multiplied by 10).

3.1.11 current ripple factor

q_i

ratio of the difference between the maximum value $I_{\max}$ and the minimum value $I_{\min}$ of an undulating current to two times the average value $\bar{I}$ (mean value integrated over one period):

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \times \bar{I}}$$

Note 1 to entry: For small values of current ripple, the ripple factor may be approximated by the following expression:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Note 2 to entry: The above expression may be used as an approximation if the resulting calculated value of q_i is equal to or less than 0,4.

[SOURCE: IEC 60034-1:2017, 3.29]

3.1.12 stable state

state of a physical system in which the relevant characteristics are considered to be sensibly constant with time

[SOURCE: IEC 60050-103:2009, 103-05-01]

3.1.13 sensibly constant

a measurement result is considered as sensibly constant when deviation from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 2,5 % (except otherwise specified)

Note 1 to entry: Stability state may be determined from the time-measurement rise plot when the straight lines between points at the beginning and end of two successive intervals of half hour each have a deviation of less than the criteria of 2,5 %.

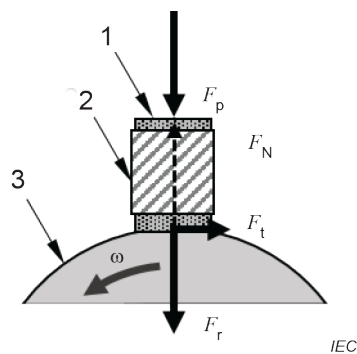
3.1.14 friction coefficient

μ

ratio of tangential force acting at the interface F_t to the radial force acting at the interface F_r :

$$\mu = \frac{F_t}{F_r} \quad (4)$$

Note 1 to entry: Figure 2 illustrates the forces acting on the brush when a radial brush-holder is applied. The numerical value of radial force F_r is equal to the numerical value of the normal reaction force F_N (of the brush contact surface on the ring) and to the numerical value of the pressure system force F_p on the brush top.



Key

- 1 Brush
- 2 Brush-holder
- 3 Test ring
- ω Angular velocity (giving the rotation direction)

Figure 2 – Forces acting on a brush

3.1.15

brush voltage drop

U_B

total voltage drop between the brush terminal and the slip ring or commutator

Note 1 to entry: U_B is a complex parameter which is made up from the sum of the voltage drops U_s , U_t , U_i , and U_c as illustrated in Figure 2 (which concerns a brush with a tamped flexible).

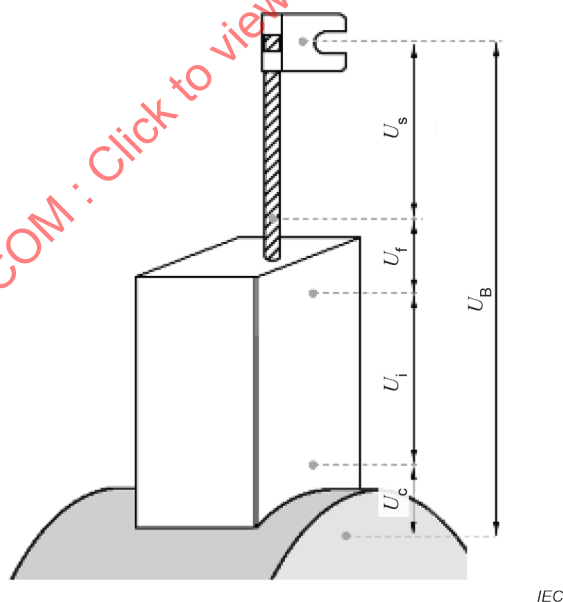


Figure 3 – Voltage drops in a brush when in operation

3.1.16

shunt voltage drop

U_s

voltage drop in the shunt (flexible) and in the shunt connection to the brush terminal

3.1.17 connection drop

 U_f

voltage drop between the shunt (flexible) and the brush grade

Note 1 to entry: The connection drop U_f measurement is described in IEC 60136.

3.1.18 brush internal drop

 U_i

internal voltage drop of the brush (due to the brush grade resistance)

3.1.19 brush contact drop

 U_c

voltage contact drop between the brush grade and the ring

Note 1 to entry: The brush contact drop U_c is an operating characteristic of a brush. See Clause 7.

3.1.20 slot pitch

 τ_Q

distance between two consecutive slots of the ring, defined by the periphery of the ring $\pi \times D$ divided by the number of slots Q :

$$\tau_Q = \frac{\pi \times D}{Q} \quad (5)$$

where D is the diameter of the ring

[SOURCE: IEC 60027-4:2006,612]

3.1.21 covering ratio

coverage ratio

 τ_B

number of segments spanned by the brush along t dimension, calculated from formula (6)

$$\tau_B = \frac{t}{\tau_Q} \quad (6)$$

3.1.22 peripheral speed

 v_p

speed of movement of a point on the surface of a body rotating about its axis expressed as a distance per unit of time

It is calculated from formula (7)

$$v_p = \frac{n \times \pi \times D}{60} \quad (7)$$

where

D is the ring diameter, in metres, and n is the speed of rotation, in number of revolutions per minute (r/min).

[SOURCE: IEC 60050-811:2017, 811-13-29, modified – formula is added]

3.1.23 current density

J_B

quantity relative to one brush and equal to current I divided by the cross-section $t \times a$ of the brush, as per formula (8):

$$J_B = \frac{I}{t \times a} \quad (8)$$

Note 1 to entry: J_B is commonly expressed in A/cm² when I is in A and t, a in cm.

3.1.24 ambient air temperature

average temperature of the air surrounding the carbon brushes samples

3.1.25 ring surface temperature

average temperature at the surface of the tested slip ring

3.1.26 brush bedding

operation at the end of which the brush contact surface is completely bedded and the patina formed on the ring surface

3.1.27 patina skin

film on the commutator or slip ring, principally constituted of the carbon brush material, commutator/slip ring metal (and its oxides) and water

[SOURCE: IEC 60276:2018, 601]

3.1.28 brush wear

Δr_i

linear wear of a brush i during the test

For each brush i the brush wear is calculated from formula (9):

$$\Delta r_i = r_{0i} - r_i \quad (9)$$

where:

r_{0i} is the r dimension of each brush i (brush length) before the test;

r_i is the r dimension of each brush i (brush length) after the test

3.1.29 brush wear rate

WR_i

brush i linear wear during a period of time, which is calculated from formula (10):

$$WR_i = \frac{\Delta r_i}{t_{er}} \quad (10)$$

where t_{er} is the effective running time

Note 1 to entry: Generally it is expressed in mm/1 000 h (mm of brush wear/1 000 effective running hours) when brush wear is expressed in mm and the result of formula above is multiplied by 1 000. See 8.4.

3.1.30

black-band zone

BB zone

interval defined by the minimum and maximum sparkless commutation limits (in between which the commutation is achieved without sparks); the limits of sparkless commutation being obtained by boosting or subtracting the excitation current in commutation poles for load currents up to and including rated current

Note 1 to entry: It corresponds to a non spark zone. This test is sometimes called back boost test.

[SOURCE: IEC 60034-19:2014, 3.1.4 – modified: definition of limits is added]

3.2 Symbols

3.2.1 Symbols and units

a	brush axial dimension (mm)
b	slot or groove width (mm)
$C1$	upper intersection line (on roughness profile)
$C2$	lower intersection line (on roughness profile)
D	diameter of test ring (m)
dr	distance ratio
d_B	distance in the brush radial direction from brush contact surface to brush top (mm)
f	frequency (Hz)
F	force applied (N or gf)
h	pitch of helical groove (mm)
HA	absolute humidity (g/m ³ of air)
HR	relative humidity
I	current (A)
J_B	current density in a brush (A/cm ² or A/m ²)
k_R	number of grooves under the brush in tangential direction
l	length or distance (m)
la	lever arm length (m)
l_{er}	distance travelled by the track under the brush during the effective running time
q_i	ripple factor
m	mass (g)
n	rotational speed (revolutions per minute, r/min)
N_B	number of brushes per machine
p	specific pressure applied on the brush (kN/m ²)
P	power (W)
P_{in}	power input when the brushes are in contact with the commutator or slip ring (W)
P_{el}	power loss due to electrical losses (W)
P_f	power loss due to friction (W)
P_0	power input when the brushes are not in contact with (are not sliding on) the commutator or slip ring (W)

r	radial dimension of brush (mm)
r_i	dimension of brush number i after the test (mm)
r_{0i}	dimension of brush number i before the test (mm)
R	resistance (Ω)
Ra	roughness, arithmetic value (μm)
RPc	peak count (number of peaks per cm)
r_B	radius of brush (mm)
S	brush contact surface area (cm^2)
t	tangential dimension of brush (mm)
t_{er}	effective running time (h)
T	torque (N.m)
U	voltage (V)
$\overline{WR}$	mean brush wear rate (mm/1 000 h)
WR	brush wear rate (mm/1 000 h)
Δr_i	wear of brush number i (mm)
$\overline{\Delta r}$	mean brush wear (mm)
μ	friction coefficient
v_p	velocity or peripheral speed (m/s)
ρ	brush grade resistivity ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
τ_Q	slot pitch (mm)
τ_B	covering ratio (number of segments spanned under the brush)
α	bottom angle (rad)
θ	temperature (K)
ω	angular velocity ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

NOTE $\overline{\quad}$ means arithmetic average value.

3.2.2 Subscripts

0	initial condition
arm	armature
B	brush
c	contact
cp	commutation pole
er	effective running (time)
f	flexible (shunt) connection
H	brush-holder
i	internal (brush grade)
in	input (power)
lc	load cell

lin	linear
min	minimum value
max	maximum value
N	normal (direction)
p	pressure system
t	tangential
r	radial
R	ring
s	flexible (shunt)
T	tare
tol-	lower tolerance
tol+	upper tolerance
vol	volumetric
α	bottom angle
+	positive polarity (when a DC current is used)
-	negative polarity (when a DC current is used)
~	alternating voltage (when an AC current is used)

3.3 Abbreviated terms

A	Ammeter
B	Booster for adjusting current
BB	Black-band
BG	Resin-bonded grade- ¹
CG	Carbon-graphite grade- ¹
G	DC generator
HC	(Hard) carbon grade- ¹
M	DC motor
MG	Metal-graphite grade- ¹
MT	Starting motor
NG	Natural-graphite grade- ¹
TC	Thermocouple
V	Voltmeter

¹ Definitions in IEC 60276:2018.

4 Test rig specification

4.1 Common specification

4.1.1 General

It is possible that no single test rig can accommodate all the required application parameters; it therefore follows that more than one type of test rig would be required. These test rigs shall be so constructed that, relative to the quantities to be measured (see Clauses 6 to 8), the required brush operating parameters may be easily and accurately obtainable.

It should be appreciated that, because of the many variables involved and the fact that this equipment is "non-commutating", absolute values obtained from such test machines will differ from those obtainable from "real" machines. Moreover, for the above reasons and because of differing ambient conditions, identical results may not be obtainable from test rigs of similar design and construction.

4.1 specifies general requirements for test rig. Additional requirements for commutators applications are disclosed in 4.2 and for slip rings in 4.3.

4.1.2 Rings

4.1.2.1 General

For the reasons given above, it is not possible to specify a single "standard" test machine, but machines constructed within the framework given below should be capable of producing satisfactory results.

4.1.2.2 Ring material

Test ring material and its characteristics, in particular hardness, should be in accordance to the application. Composition and hardness according to ISO standard shall be specified in the test report.

4.1.2.3 Rings dimensions and geometry

The diameter of the test ring shall be not less than 200 mm.

The geometrical profile of the ring shall be measured using a suitable depth gauge when the ring mounted on its axis rotating slowly in its own bearings. The run-out shall not produce a depth gauge deflection of greater than 0,010 mm with one wave. Furthermore, at operating speed there shall be no significant vibration due to unbalance. The tests shall be carried out at a speed lower than the critical speed. Run-out shall be recorded in test report.

This order of accuracy shall be achieved if the ring is turned with a suitable tool at a speed as near as possible to the highest test velocity, the ring being mounted in its own bearings. All "burrs" and swarfs shall be removed from the slots / grooves and slot / grooves edges before the test. The minimum amount of metal only shall be removed during this turning process in order to prevent the formation of bevels on the edges.

From the measurement of the profile at two different tracks of the ring the cylindricity may be evaluated. A maximum value of 0,010 mm is recommended.

4.1.2.4 Roughness

Roughness is an index for the commutator or slip ring surface irregularity.

Roughness meter shall be in accordance with ISO 3274.

The measurement of roughness Ra and the peak rate RP_c shall be done within both tangential and axial directions, unless the tangential probe cannot be applied due to a small commutator bar width.

The degree of roughness Ra shall lie between 0,8 μm and 1,2 μm .

For the evaluation of RP_c it is recommended to define the upper intersection line and lower intersection line at a distance of respectively +1 μm and –1 μm from the intersection diagram mean line.

The peak rate RP_c shall be over 100 peaks per centimetre.

The suitable roughness may be readily obtained by a light application of a suitable medium grade stone to the ring surface (see 5.4.5).

4.1.3 Brushes

A minimum of two brushes per track shall be used. If more than this number of brushes per track is used, they shall be uniformly spaced around the ring.

Table 1 specifies the dimensions of test brushes, where preferred dimensions are marked in bold characters.

Table 1 – Dimensions of test brushes

Dimensions in millimetres

Dimension	Brush grade				
	EG	BG	CG-HC	NG	MG
t	12,5 – 16 – 20	10 – 12,5	10 – 12,5 – 16	25 – 32	12,5 – 20 – 32
a	25 – 32	25	25	20 – 25	20 – 25
r	40 to 50	40 to 50	40 to 50	50	50

It is appreciated that asynchronous and synchronous motor slip rings use a brush having the t dimension greater than the a dimension. To maintain the standardization of test apparatus, the same holders as recommended for "commutator" may be used. Those having the largest t dimension are to be preferred.

The brush manufacturing shall be within IEC 60136.

The brushes may preferably be made with a bottom bevel angle between 7,5° and 8° (trailing attitude – see Figure 4.c) to ensure the mechanical stability, as explained in 4.1.4.

4.1.4 Brush holders

Brush holders shall be substantially constructed and rigidly affixed to the machine so that they are free from vibration under the most adverse conditions, and of such design that they will not influence the stability of contact between test brush and test ring. Distance between brush-holder and commutator shall be between 2 mm and 3 mm. The bottom of the brush box shall be parallel to the test ring.

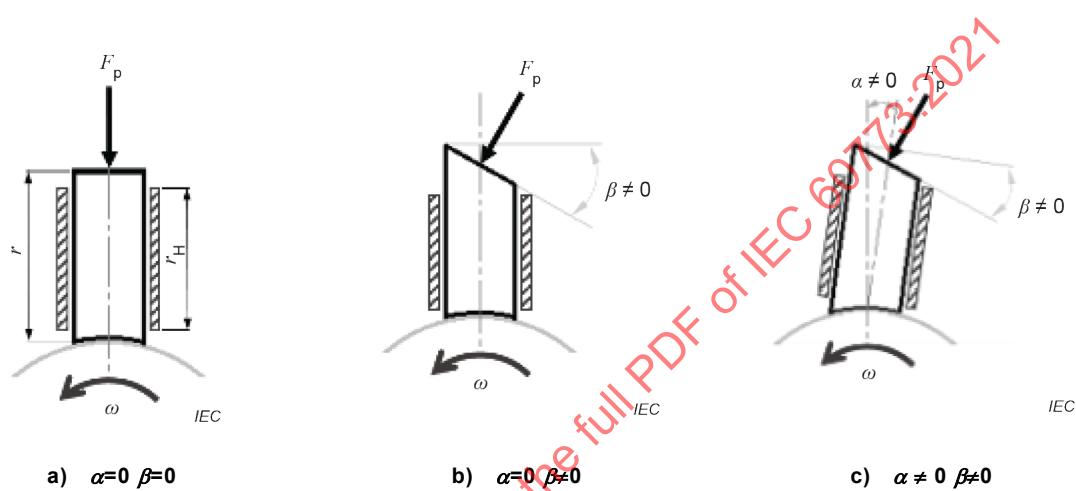
The dimensions a and t of the brush holder shall be suitable for brushes dimensions as indicated in Table 1, with respect to the clearances specified in IEC 60136.

The radial dimension of the brush holder r_H shall be not less than $\frac{3}{4}$ of the radial dimension r of a new brush.

The brush-holder shall be such that the force is applied in the radial dimension r of a brush (as shown in Figure 4) to get a good stability of the brush:

- a) when bottom bevel α is equal to zero:
 - 1) within a radial pressure system (such as compressive spring acting directly on the top): without any top bevel, as shown in Figure 4a);
 - 2) within a self-recoiling spring: with an adequate top bevel β (example 22,5°), as shown in Figure 4b);
- b) with an adequate top bevel β when the contact angle α is 7,5° – 8° (Figure 4c).

Bevel angles shall be written in the test report.



Key

- α Bottom bevel
- β Top bevel
- r_H Radial dimension of the brush-holder
- F_p Force applied by the pressure system
- ω Angular velocity (direction of rotation)

Figure 4 – Brush holder configuration

The required brush specific pressure p , as specified in 5.2, shall be to a tolerance of ± 5 % between brushes.

The pressure force F_p of the spring system shall be defined according to the brush contact surface area S and the required brush specific pressure p from formula (3) defined in 3.1.10.

It is recommended to measure the pressure force F_p according to IEC TR 61015. Other measuring instruments may be used, for example dynamometers. All instruments shall have a good accuracy (2,5 % maximum deviation).

NOTE When a commutator type test ring is applied the slots dimensions are not considered for the calculation of brush pressure.

4.1.5 Power supply

4.1.5.1 General

Whichever type of power source is chosen, it should be capable of maintaining the selected load current to within ± 5 % of the required value for the test in progress and have a quick response to changes of contact voltage.

4.1.5.2 Direct current supply

4.1.5.2.1 DC generator

To be capable of supplying the maximum likely demand when a stabilizing ballast resistance is included in the test brush circuit; alternatively, a constant-current source of short time-constant, such as a welding generator, may be used.

4.1.5.2.2 Diode rectifier

Fed from an AC source and capable of supplying the maximum likely demand.

The ripple factor q_i of the source shall not exceed 0,05 (5 %). This value should be recorded for each test.

4.1.5.2.3 Controlled rectifier

Specification for controlled rectifier is the same as for diode rectifier (4.1.5.2.2).

4.1.5.3 Alternating current supply

The alternating current supply, for example an inverter, shall be selected so that a sensibly pure sine wave output can be obtained over the required current range.

4.1.6 Instrumentation

4.1.6.1 Friction coefficient

4.1.6.1.1 General

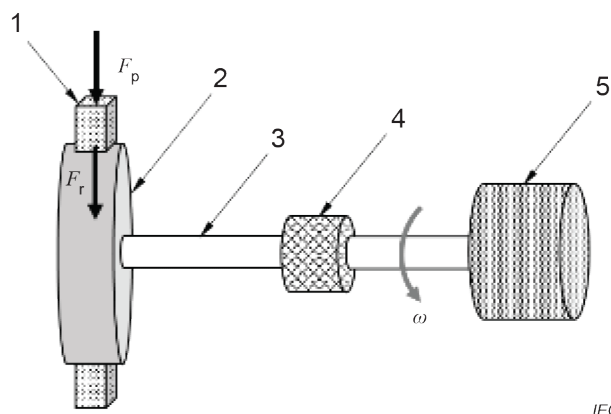
There are two main systems by which the coefficient of friction is usually measured. They are presented in 4.1.6.1.2 and 4.1.6.1.3. Whatever system is used it shall have negligible effect on the mechanical stability and electrical performance of the brush.

There are many suitable mechanical systems which may be used for making this measurement and all should be acceptable provided their accuracy is according to 4.1.6.1.6.

4.1.6.1.2 Method a): Measurement of the tangential forces acting on the rotating surface

The method consists in measuring the mechanical torque with and without the carbon brushes at the same operating condition of the drive motor and same parameters (J_B , pressure, HR , etc.) for the carbon brushes and the excitation system. Then the friction coefficient can be determined from the relation between the torque and the applied calibrated force onto the brush (should be normal and constant) according to formula (14) specified in 6.4.1.

Figure 5 is a simplified sketch which clarifies the method of measuring the coefficient of friction by using method a).



Key

- 1 Brush
- 2 Test ring
- 3 Shaft
- 4 Torque meter
- 5 Drive motor
- ω Angular velocity
- F_r Reaction force of the ring
- F_p Force applied on the brush by the pressure system

Figure 5 – Measurement of the mechanical torque by Method a)

NOTE With the test rig arrangement of Figure 5 the brush-holder is radial to the ring. Therefore numerical value of F_r is equal to the numerical value of F_p (directions are opposite but absolute values are equal).

Vibrations on the test bench are recommended to be as low as possible. An accelerometer may be used to control the vibration along the test duration.

4.1.6.1.3 Method b): Measurement of the tangential forces acting on the brush

4.1.6.1.3.1 General principle

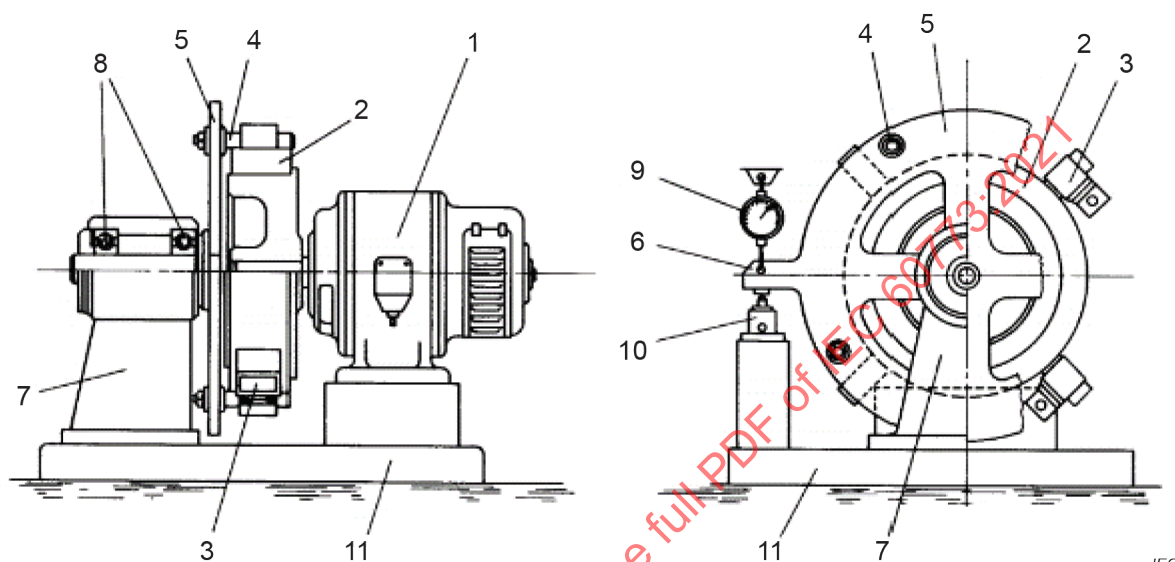
Figure 6 shows the fundamental design of a test rig arrangement. The test rig shall fulfill the following requirements:

- The axes of the rotating slip ring and the brush holder support ring shall be made as concentric as possible.
- The dynamometer assembly shall be mechanically stiff (i.e. rigid) and have the maximum possible mass in order to provide adequate damping of the high frequency vibrations generated by the brushes under test.
- Great care shall be taken to ensure that the friction of the brush holder support ring bearings is minimal in order that the measured brush friction force is not adversely affected. The angular movement of the brush holder support ring shall be restricted so that the relative tangential movement of the brush to cage should not exceed 0,5 mm. A means for blocking the rocker movement within the ring rotation direction shall be added. For this purpose a cable may be fixed on the lever arm.
- There are, nowadays, many acceptable systems, both mechanical and electrical available for measuring the brush friction force; one suitable for the design of the dynamometer should be selected from the following list:
 - a) strain gauge;
 - b) load cell;
 - c) displacement transducer;

- d) differential transformer;
- e) lever and mass;
- f) spring balance.

Instruments a) to d) allow use of recording instruments for continuous measurements.

Preferred method is using a load cell (item b) above and 10 in Figure 6) equipped with a connection for recording output voltage.



IEC

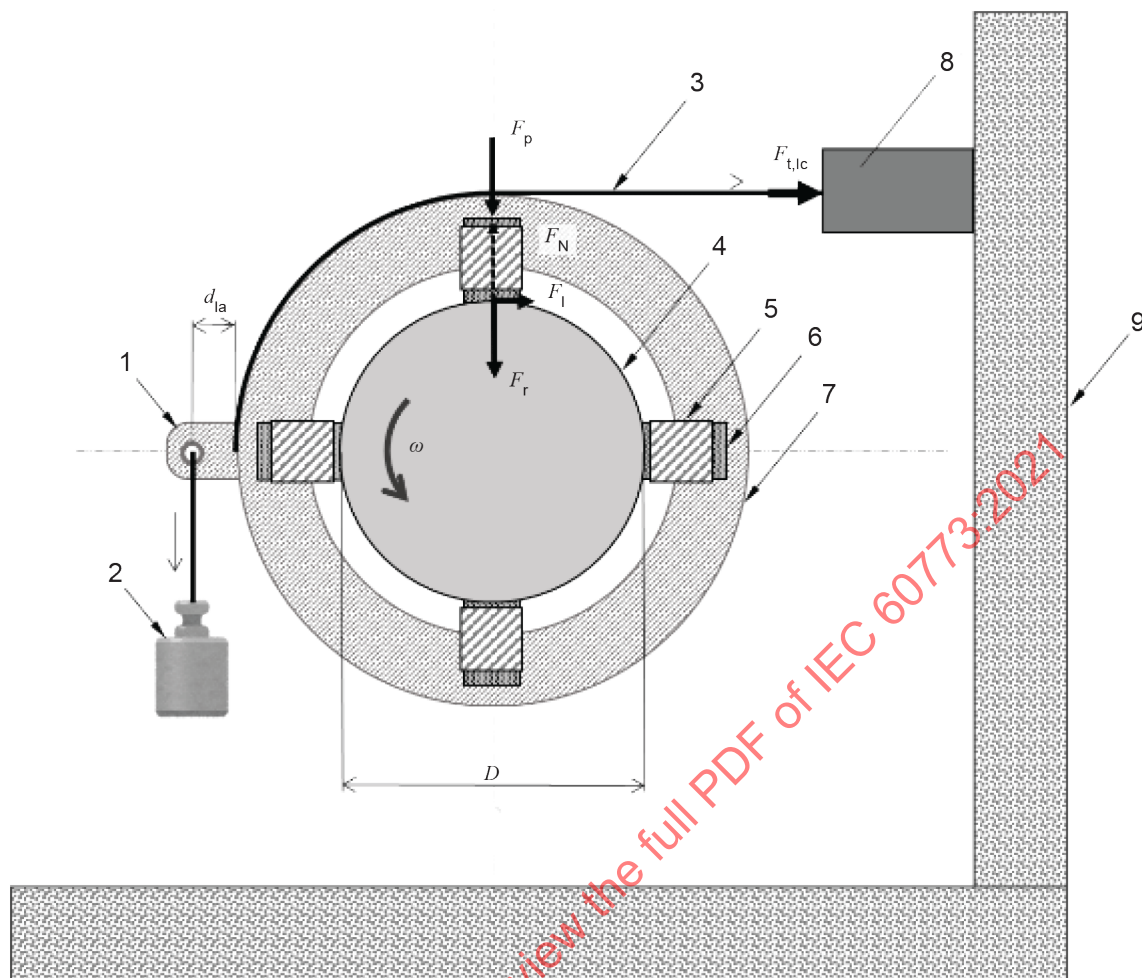
Key

- 1 DC motor or variable speed drive
- 2 Test ring
- 3 Brush holder and brush
- 4 Brush holder support spindle
- 5 Brush holder support ring
- 6 Dynamometer lever
- 7 Dynamometer bearing housing and pedestal
- 8 Dynamometer bearings
- 9 Force measuring device (spring balance)
- 10 Electric load cell
- 11 Base plate

Figure 6 – Brush test machine for Method b)

4.1.6.1.3.2 Principle for the method with the load cell

Figure 7 illustrates the principle. The brush rocker is mobile on its rotation axis. The strain gauge is connected to the brush rocker with a cable. The cable is fixed on a lever arm which is part of the rocker. As the rocker ring will move when the ring is rotating, a tare (known mass) is hung to the lever arm.



IEC

Key

- 1 Lever arm
- 2 Tare
- 3 Cable
- 4 Test ring
- 5 Brush holder
- 6 Brush
- 7 Free rocker ring
- 8 Strain sensor
- 9 Support of the test rig
- ω Angular velocity (direction of rotation)
- F_r Force in the radial direction
- F_t Force in the tangential direction
- F_p Force of the spring applied on the brush
- $F_{t,lc}$ Tangential force measured by the load cell
- F_N Normal force

Figure 7 – Test rig arrangement with a load cell

The mass of the tare m_T is chosen to block the displacement of the rocker along the rotating direction of the ring and to ensure a proper tension of the cable. As the tare will be part of the forces acting on the rocker, its mass value shall necessary be taken into account in calculations.

The tangential force is directly measured by the load cell when properly adjusted.

The load cell adjustment could be done by different methods. One method is described in Clause A.2.

NOTE The test rig described in Figure 7 uses a radial brush-holder.

4.1.6.1.4 Calibration

In order to get accurate values sensors (load cell, torque meter, etc.) shall be calibrated regularly. A period of 3 months is recommended in order to ensure there is no deviation.

NOTE Calibration concerns the test instrument itself, whereas adjustment is relative to the calculation of a physical quantity from output values of the test instrument.

For more accuracy the friction of air could be taken into account. As it is speed dependent a measurement of the residual friction has to be done at different values of speed.

4.1.6.1.5 Adjustment

When using Method b) with a load cell, the tangential force is directly measured by the load cell by an adjustment. The load cell adjustment could be done by different methods. One method is described in Clause A.2.

4.1.6.1.6 Accuracy

Instruments of accuracy up to 5 % will be adequate.

4.1.6.1.7 Stable state

Friction coefficient is considered as sensibly stable when deviation from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 5 %.

4.1.6.2 Voltage drop

4.1.6.2.1 General

Voltage drop is determined by using an instrument for measuring voltage between 2 contact points, one on the brush and the other one on the ring.

4.1.6.2.2 specifies the instruments for measuring voltage.

Ring contact probe is specified in 4.1.6.2.3.

The contact point location on the brush depends on the type of voltage drop intended to be determined (contact or total voltage drop – see Clause 7) and brush contact probes are described in 4.1.6.2.4.

4.1.6.2.2 Measurement instruments for voltage

4.1.6.2.2.1 Voltage measurement instruments for DC

Any DC voltmeter having an internal resistance of not less than 1 000 Ω/V is suitable. If a pointer type instrument is used, then the minimum indication shall be not less than 20 % of full scale deflection.

4.1.6.2.2.2 Voltage measurement instruments for AC

AC contact drop voltage should be measured with an instrument capable of measuring true r.m.s. Such instruments are:

- a) thermocouple instruments,
- b) ironless electrodynamic instruments,
- c) any electronic instrument capable of measuring true r.m.s.

The internal impedance shall be as specified in 4.1.6.2.2.1.

Rectifier type multimeters are not recommended.

It is highly recommended to select an instrument compatible with data acquisition system, so that voltage could be measured and recorded continuously during a test.

4.1.6.2.2.3 Accuracy

Instruments of accuracy up to 2,5 % will be adequate.

4.1.6.2.2.4 Stable state for voltage

Voltage drop is considered as sensibly stable when deviation from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 5 %.

4.1.6.2.3 Rotating part probe

The contact probe to be applied to the rotating part shall be so constructed that it will have negligible influence on the value of the measured voltage. Various acceptable methods of making this probe are available, for example:

- a) a small metal-graphite brush running on the rotating part but clear of the test brush track (generally made of silver-graphite),
- b) a "brush" made from fine copper wires (brush flexible) applied in the same way as the metal-graphite brush (see item a) above),
- c) an additional measuring ring electrically connected to the test ring and equipped with measuring brushes,
- d) a mercury transmitting system.

Contact probe type will depend on the instrument used for measuring voltage.

Whichever type of probe a) or b) is used, it is essential that the point of application to the rotating part shall be clear of the test brush track(s). It is recommended to apply the contact probe on the disk part of the ring.

4.1.6.2.4 Brush contact probe

4.1.6.2.4.1 General

The brush contact probe shall be applied to the brush so that no disturbance of the brush operation is caused. It may be permanently attached to the brush or to the brush-holder, or may be applied by hand.

4.1.6.2.4.2 Brush probe type 1 for total brush voltage U_B

The probe shall be applied to the brush terminal.

When hand recording instruments are used, it is recommended to use a pointed stainless steel probe.

4.1.6.2.4.3 Brush probe type 2 for brush contact voltage U_c

The location of the contact probe on or in the brush shall be at a point not more than 5 mm from the sliding contact surface and at a distance of 5 mm from the centre line of the brush as illustrated by Figure 8.

Dimensions in millimetres

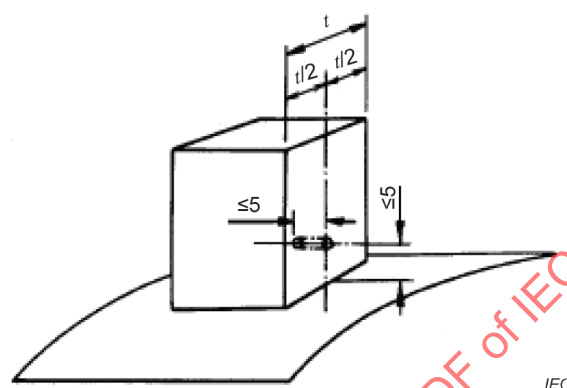


Figure 8 – Brush contact probe application point for U_c

4.1.6.3 Temperature instrumentation

4.1.6.3.1 General

Instruments for the measurement of temperature will depend on the location of the temperature to be measured and on the range of temperature. Therefore instruments to be applied on brushes and rings may be different.

IEC 60751 and 60584-1 describe some measuring instruments.

4.1.6.3.2 Temperature of brushes

For brush temperature measurement, following sensors shall be used:

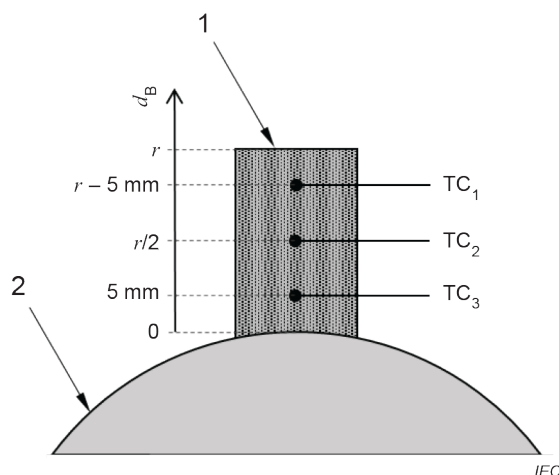
- platinum applied resistance temperature sensor, as specified in IEC 60751,
- thermocouples, as specified in IEC 60584-1.

The advantage of the first one is the linearity between temperature and its output resistance value. A typical example is Pt100 where the typical resistance value is 100 Ω at 0 °C.

However, thermocouples are easy to apply, due to their smaller sizes, but need to be carefully chosen and well calibrated.

For the distribution temperature measurement inside the brushes thermocouples TC shall be inserted along the center line of the brush at three location points as illustrated in Figure 9:

- TC₁ at 5 mm from the brush top (distance d_B is therefore equal to $r-5$ mm),
- TC₂ in the center of the brush (distance d_B is therefore equal to $r/2$) and
- TC₃ at 5 mm from the contact surface (distance d_B is therefore equal to 5 mm).



Key

- 1 Brush
- 2 Test ring
- TC_i Thermocouple position number i
- r Radial dimension of the brush
- d_B Distance in the brush along r direction from the contact surface

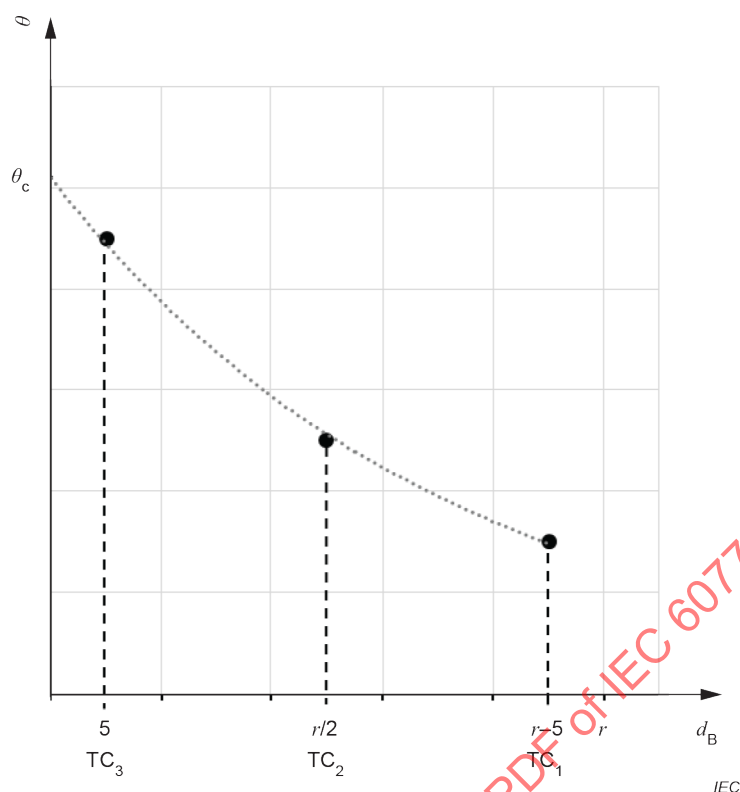
Figure 9 – Thermocouples insertion position

Thermal conductivity of the brush grade is recommended to be included in the test report.

The temperature at the brush/ring interface θ_c shall be measured either by:

- embedded temperature sensors in the ring (see 4.1.6.3.3), or
- extrapolation from the readings of the three embedded thermocouples TC1, TC2 and TC3, as illustrated by Figure 10, by using a linear regression with an exponential function.

NOTE For a higher degree of accuracy evaluation may be based on thermal conductivities and temperature measured by the couples TC1, TC2 and TC3 in the centre line of the brush.

**Key**

- d_B Distance from the contact surface to the top of the brush in radial direction
 r Radial dimension of the brush
 TC_i Thermocouple position number i
 θ Temperature
 θ_c Contact temperature

Figure 10 – Evaluation of contact temperature θ_c by interpolation

4.1.6.3.3 Rings temperature

Two main methods of measuring the temperature of rings are recommended:

- a thermocouple (according to IEC 60584-1) or any kind of fingertip using a thermocouple (for example a surface pyrometer including thermocouples);
- a resistant thermometer (according to IEC 60751).

Alternatively, another method is possible, in which a thermocouple may be embedded into the ring during its construction, and the wires brought out to two auxiliary measuring slip rings or a telemetry mounted coaxially to the test ring. If this method of measurement is adopted, the auxiliary slip rings shall be made of copper, silver-plated copper or silver and made to the smallest practical diameter. The output voltage of the thermocouple shall be collected by not less than two silver-graphite brushes per ring. These auxiliary slip rings shall be protected from external thermal effects. For applications where steel slip rings with grooves are common these slip rings can be also used for the tests. Additionally, the thermal conductivity of the steel and the exact position of the thermocouples have to be considered to extrapolate to the ring surface temperatures on the bases with a reasonable degree of accuracy.

Methods a) and b) will give an average temperature of the ring, whereas the method within the thermocouple embedded into the ring will provide a distribution of temperature of the ring. Any attention shall be paid during interpretation when using the last method.

When possible, a cooling curve of temperature versus time should be made for each test machine, in particular when a new test is planned.

A bulb-thermometer is not recommended.

An infrared camera should not be used to measure the slip ring surface temperature because of its low accuracy and poor precision. Anyway it could be helpful for interpretation to get the temperature distribution around the brush/slip ring environment.

4.1.6.3.4 Accuracy

The instrument used shall enable the temperature to be measured within a precision of $\pm 0,5$ K or better.

4.1.6.3.5 Calibration

The temperature sensors such as thermocouples shall be periodically calibrated. A period of 3 months is recommended to ensure that the relationship between the voltage and the temperature has not deviated.

4.1.6.3.6 Stable state for temperature

Temperature characteristic is considered as sensibly stable when deviation from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 1 K.

4.1.6.4 Brush dimension measuring instruments

4.1.6.4.1 Measuring instrument

The choice of instrument, micrometer, vernier calliper or depth gauge, used to make the measurement will largely depend on the amount of wear which has occurred.

To measure brushes of difficult shape, a suitable jig to fit in the micrometer could be constructed to ensure positive location of the brush to be measured. Furthermore, the choice of micrometer anvil shape depends on the profile of the shape to be measured.

4.1.6.4.2 Accuracy

The instrument used shall enable the wear to be measured within a precision of $\pm 2,5$ % or better.

4.1.6.4.3 Calibration

Measurement instruments for dimension shall be periodically calibrated. A period of 1 year is recommended.

4.1.6.5 Current measuring instruments

4.1.6.5.1 Measuring instrument

Any suitable test measuring device can be used. One simple method is using a clamp ammeter to measure the current passing through the cables of each brush. Hall effect sensors or an oscilloscope may also be used.

Attention shall be paid while selecting the test device according to the nature of the current to be measured (some of them do not allow measurement of AC current) and to the sensitivity (for AC and DC).

4.1.6.5.2 Accuracy

The instrument used shall enable the current to be measured within a precision of $\pm 0,5$ % or better.

4.1.6.5.3 Calibration

Measurement instruments for current shall be periodically calibrated. A period of 1 year is recommended.

4.1.6.5.4 Stable state

Current measurement is considered as stable when deviation in percent from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 5 %.

4.1.6.6 Peripheral speed

4.1.6.6.1 General

Peripheral speed v_p characteristic is calculated from the rotational speed of the ring measurement and ring diameter by formula (7) defined in 3.1.22.

4.1.6.6.2 Rotational speed instrument

Any suitable test measuring device can be used. One simple method is using a stroboscope. For more accuracy and automatic measurement a tachometer may be installed on the test rig.

4.1.6.6.3 Accuracy

The instrument used shall enable the speed to be measured within a precision of ± 50 r/min or better.

4.1.6.6.4 Stable state

Speed characteristics is considered as stable when deviation from mean value of a minimum of 3 consecutive measurements is less than 2,5 %.

4.2 Test rig specification for commutators

4.2.1 General

For DC operation the test rig is not exactly a real commutator, that is to say the test ring design simulates the mechanical behaviour by using slots machined along the axial direction, but does not introduce commutation.

4.2.2 Test rings

4.2.2.1 Material

Test ring material should be in accordance to the application of DC machine. The test ring shall be constructed of copper as specified in IEC 60356.

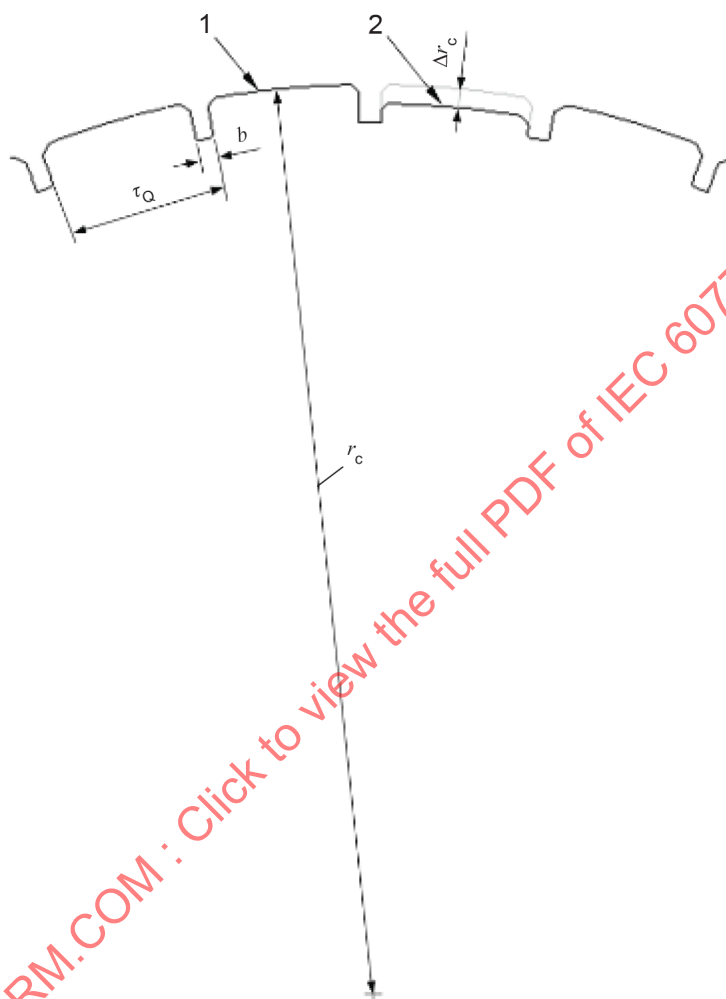
4.2.2.2 Dimensions of test rings

The diameter D of the test ring shall be not less than 200 mm and not more than 300 mm. Preferred dimension is 220 mm.

The axial length of the slotted ring shall be equal to the a dimension of the test brush, plus at least 6 mm.

Axial slots, evenly spaced on the surface of the ring shall be cut to give a slot pitch τ_Q in the range of 5,0 mm to 7,5 mm. The width b of the slots shall be between 0,8 mm and 1 mm and their depth between 1 mm and 3 mm. Each segment shall have the same radius as that of the whole ring.

During preparation the use of abrasive paper or cloth to remove tool marks and/or a very high surface polish shall be limited in order to avoid "doming" the bar section. See Figure 11.



IEC

Key

- r_c Radius of the test ring
- Δr_c Difference between the radius of the test ring and the radius of a doming bar section
- b Slot width
- τ_Q Slot pitch
- 1 Standard bar section (with a radius r_c)
- 2 "Doming" bar section (with a radius $r_c - \Delta r_c$)

Figure 11 – Illustration of bar grooves dimensions and preparation

The dimensions τ_Q and b shall be carefully chosen to eliminate the risk of mechanical resonance by considering the number of segments spanned by the brush (also named covering ratio τ_B). Formulas (11) and (12) give the relationship between τ_Q , t and b :

$$k \times \tau_Q \neq q \quad (11)$$

and

$$t - b < q < t + b \quad (12)$$

where

- k is a whole number selected from the values 2, 3 or 4;
- q is a variable number;
- t is the brush tangential dimension;
- b is the slot width;
- τ_Q is the slot pitch.

In other words the covering ratio of the brush τ_B shall not be a whole number. Preferred values of τ_B , are to be selected between 3 and 6, with a first decimal number as closed as possible to 5.

Example: 3,5 or 4,5.

Figure 12 shows an example of correct or wrong brush covering.

NOTE To be more comprehensive, one practical method for determining proper dimensions step by step is proposed below:

- a) Dimension t shall be chosen from preferred values in Table 1.
- b) Choose a value of τ_Q between 5,0 mm and 7,5 mm.
- c) Check if τ_Q is suitable:
 - 1) Calculate the number of slots Q by applying formula (5). It shall be a whole number. If not go back to b),
 - 2) Calculate the covering ratio τ_B (number of segments spanned by the brush) by formula (6).
- d) If τ_B is an integer, chose another value of τ_Q :
 - 1) Calculate new τ_Q from a value of τ_B closed to the previous one with a first decimal equal to 5 (see example below),
 - 2) Calculate new Q by using formula (5). If not a whole number, round off to the nearest and calculate again τ_Q and τ_B (see example below).
- e) Choose a value of b between 0,8 mm and 1,0 mm.
- f) Check if b is suitable according to formulas (11) and (12).

Example: ring diameter D : 220 mm.

- a) Select a tangential dimension of brush t : 25 mm.
- b) Select the width τ_Q : 5 mm.
- c) Then calculate Q and τ_B :

Formula (5) $Q = D / \tau$ numerical value is 44: whole number – valid.

Formula (6) $\tau_B = t / \tau_Q$ numerical value is 5: whole number – invalid. Therefore the value of τ_Q shall be changed.

- d) Choose a new value of τ_B with a first decimal of 5: 4,5.

Then calculate the numerical value of τ_Q : 5,55 mm and of Q : 39,6

Q is invalid because it is not a whole number. It shall be rounded off to the nearest whole number: 40.

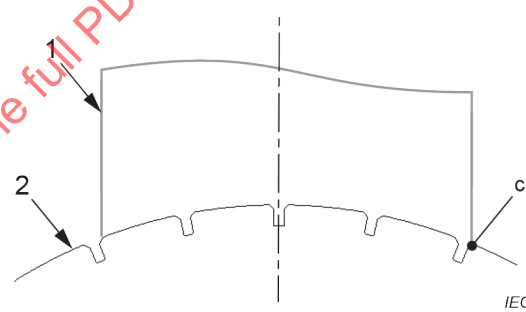
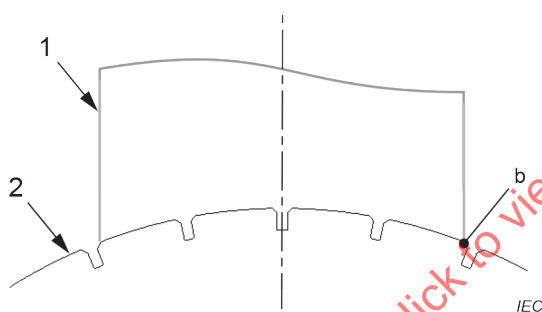
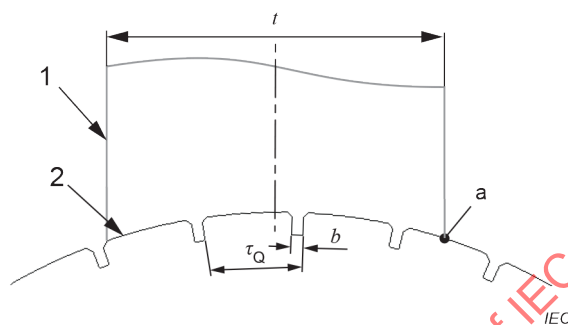
Then calculate again the numerical value of τ_Q : 5,5 mm and of τ_B : 4,54. All criteria are satisfied.

- e) Choose a slot width b : 0,8 mm. Then calculate:
 f) $t - b$ numerical value is 24,2 mm and $t + b$ numerical value is 25,8 mm

Calculation of $k \times \tau_Q$ for different values of k :

k	2	3	4
$k \times \tau_Q$ (mm)	11	16,5	22

All values of $k \times \tau_Q$ are below 24,2 mm. It means that the numerical value for b 0,8 mm is correct.



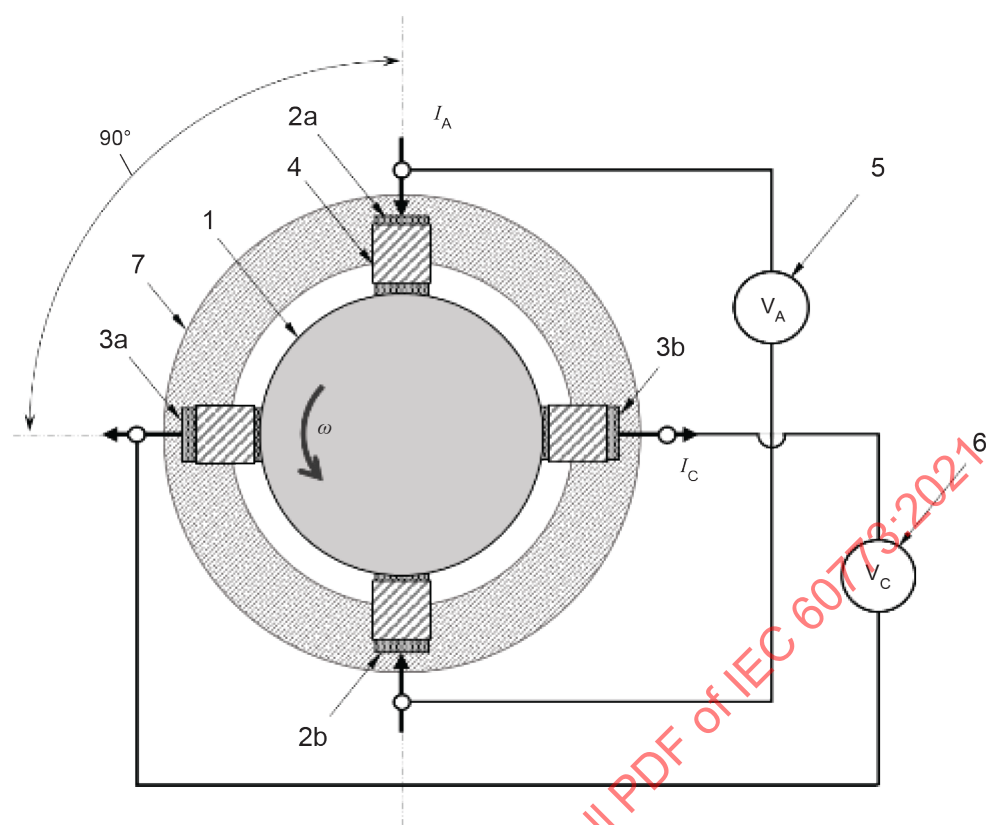
Key

- 1 Brush
- 2 Brush-holder
- a Correct brush covering: 3,5 (3 segments + 3 slots + ½ segment)
- b Wrong brush covering: 3,9 (4 segments + 3 slots)
- c Wrong brush covering: 4 (4 segments + 4 slots)

Figure 12 – Brush covering

4.2.3 Brushes arrangement

Preferably, four brushes equally spaced around the test ring shall be used, as indicated in Figure 13. The brushes shall be of alternate polarity.



IEC

Key

- 1 Slip ring
- 2 Positive brush (anode brush) a and b
- 3 Negative brush (cathode brush) a and b
- 4 Brush-holder
- 5 Voltmeter V_A for positive brush total contact drop
- 6 Voltmeter V_C for negative brush total contact drop
- 7 Brush-rocker
- I_A Anode brush current
- I_C Cathode brush current

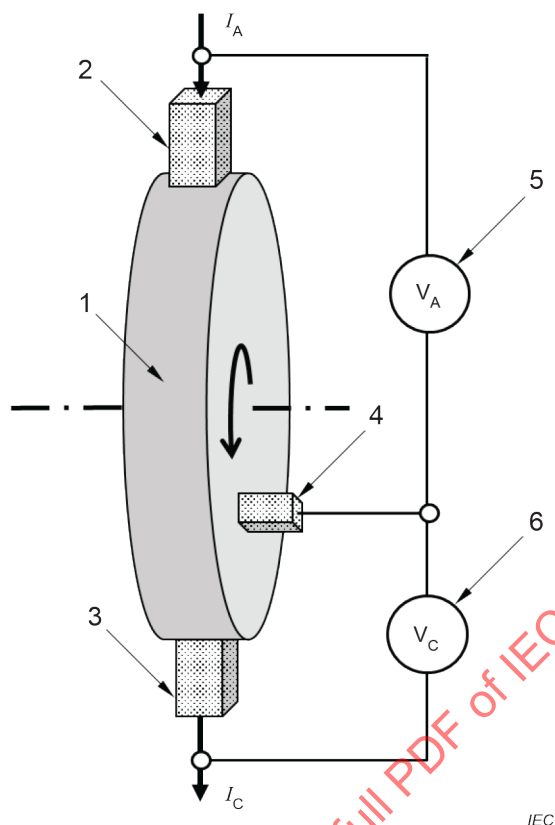
Figure 13 – Brushes configuration

If, for any reason, it is necessary to operate with two brushes only, then the angular spacing between them should be between 90° and 180° .

4.2.4 Special brush for voltage drop measurement

Brushes are arranged by pair: one positive for current entry and one negative for current exit. A control brush is added on the side of the ring. It shall have a negligible voltage drop. Generally it is made of silver graphite grade.

Figure 14 describes a brush arrangement (with 2 brushes) for the measurement of brush total contact drop U_B . In this configuration the voltage drop U_B is the average of the voltage drop of each polarity.



Key

- 1 Slip ring
- 2 Positive brush (anode brush)
- 3 Negative brush (cathode brush)
- 4 Control brush
- 5 Voltmeter V_A for positive brush total contact drop
- 6 Voltmeter V_B for negative brush total contact drop
- I_A Anode brush current
- I_C Cathode brush current

Figure 14 – Control brush arrangement

4.3 Test rig specification for slip rings

4.3.1 General

Except dimensions the test ring and brush arrangement shall be as close as possible to the real application. Especially the material selection is important in the view point of friction coefficient and voltage drop evaluation.

4.3.2 Ring

4.3.2.1 Materials

Based on the application, these rings may be manufactured of non-ferrous materials (bronze, copper) or ferrous material (steel, stainless steel).

The use of copper alloys containing zinc, silicon, lead, aluminium, chromium shall be avoided. They may affect brush operation by causing mechanical instability (brush wear, high friction, etc.).

For general purpose the use of bronze type CuSn12 or CuSn8Ni3P according to ISO 1190-1 or stainless steel type X10Cr13, which corresponds to 4006-410-00-I according to ISO 15510, is recommended.

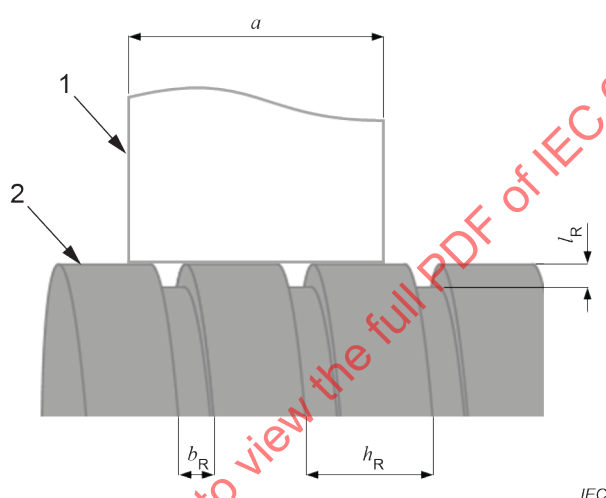
Together with the test results, the composition and mechanical characteristics or the reference of the ISO standard material of the ring should be stated.

4.3.2.2 Dimensions

- a) These rings shall be not less than 200 mm diameter and may be plain or helically grooved. Preferred diameter D is 220 mm.

The selection of the diameter shall take into account the peripheral speed. In case of large dimensions stability may decrease due to vibrations. It is recommended a maximum of 250 mm.

- b) If helically grooved, the following configuration of Figure 15 shall be used:



Key

- 1 Brush
- 2 Helically grooved slip-ring
- a Axial dimension of the brush
- b_R Groove width
- h_R Groove pitch
- l_R Groove depth

Figure 15 – Characteristics of grooves

The groove shall be "single-start". The depth of the slot l_R is generally between 4 mm and 5 mm and shall not be below 3 mm.

Groove pitch h_R shall be a submultiple of a (axial dimension of the brush) in order to avoid pulsations of brush pressure. In other words the the number of grooves under the brush k_R shall be an integer.

Example: For a brush with a dimension of 25 mm, pitch h_R numerical value is 12,5 mm.

The groove width b_R should lie between $h_R/3$ and $h_R/4$. A numerical value of 3 mm is recommended.

The instrument used for profile measurement shall be adapted to this configuration.

- c) The calculation of brush pressure (formula (3) defined in 3.1.10) and current density J_B (formula (8) defined in 3.1.23) shall be the same as for plain rings, that is, the effect of a helical groove on these quantities shall be ignored.

NOTE In case of helical groove with a large groove width b_R the current density at contact J_{Bc} may be an important information for interpretation. It is calculated from formula (8) by replacing the brush section $t \times a$ by the real contact surface of the brush:

$$J_{Bc} = \frac{I}{t \times a - b_R \times k_R}$$

where k_R is the number of grooves under the brush (integer).

4.3.3 Brushes

A minimum of two brushes per ring shall be used. If more than this number of brushes per ring is used, they shall be uniformly spaced around the slip ring and in no case shall the total brush surface area exceed 15 % of the surface area of the ring.

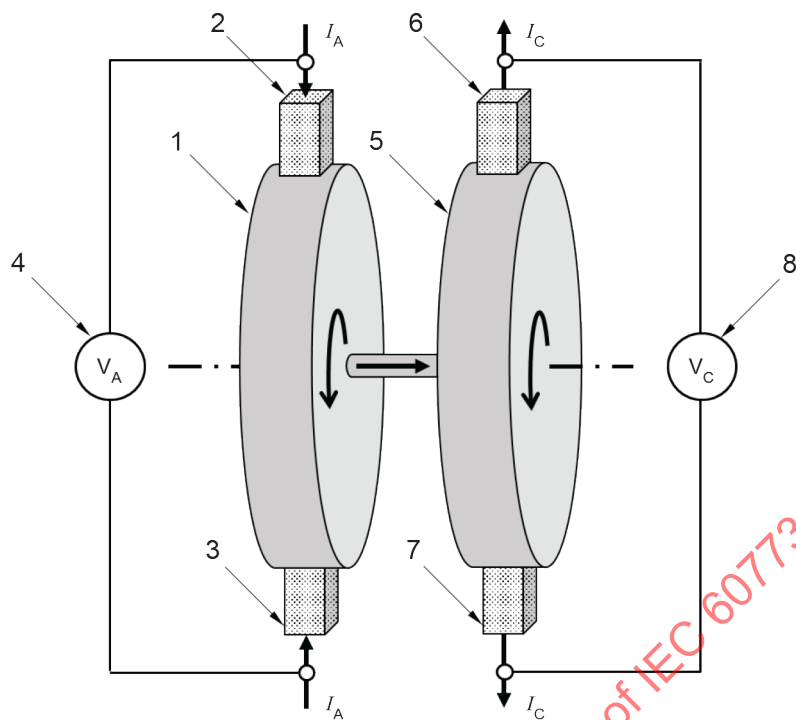
NOTE In purely comparative testing it is considered that the use of "trailing" aspect brush holders would not be deleterious and would reduce the number of brush holder types required.

4.3.4 Configuration for DC and AC operation

4.3.4.1 For DC operation

Each polarity (anode and cathode) shall be tested separately. Two methods can be employed:

- a) 2 different rings on the same test rig: one running as anode, the other one as cathode. In that case, on each ring, brushes are at the same polarity, as illustrated by Figure 16.



IEC

Key

- 1 Anode slip ring
- 2 Positive brush 1 (anode brush)
- 3 Positive brush 2 (anode brush)
- 4 Voltmeter 1 for anode brush total contact drop
- I_A Anode brush current
- 5 Cathode slip ring
- 6 Negative brush 1 (cathode brush)
- 7 Negative brush 2 (cathode brush)
- 8 Voltmeter 2 for cathode brush total contact drop
- I_C Cathode brush current

Figure 16 – Test rig arrangement for DC operation with 2 brushes per polarity

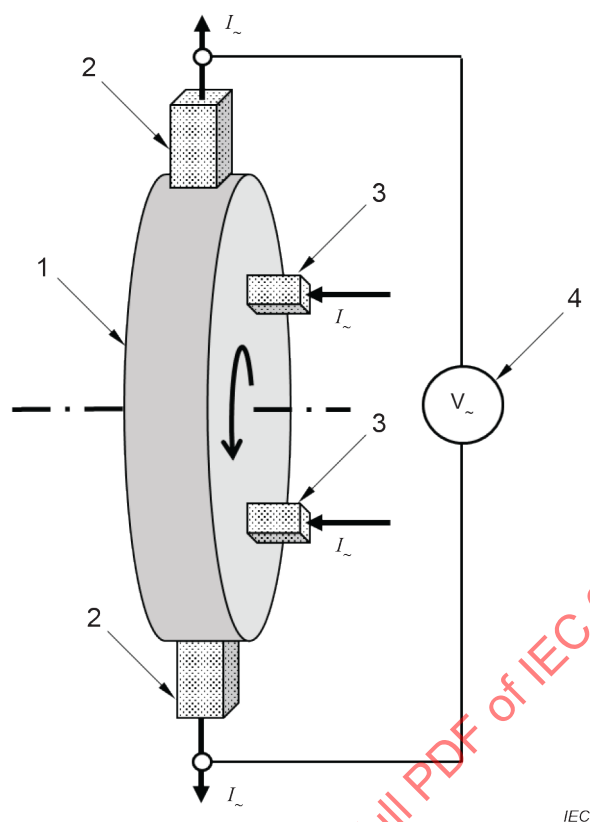
- b) One ring: test firstly anode condition then cathode conditions. In that configuration an additional brush is added on the flat part of the tested ring to close the circuit.

4.3.4.2 For AC operation

Only one phase is tested. AC power supply is connected on one hand to the test ring, by applying one or two additional brushes on the flat part of the test ring, and on the other hand to the brushes, as illustrated in Figure 17.

As for the special brush for voltage measurement specified in 4.2.4, the additional brushes for connecting the current to the test ring shall be of a suitable material such as the contact voltage to the ring is negligible. For example suitable grade is selected in the silver-graphite family.

At high rotating speed the grade of the additional brush may be chosen from natural graphite family. The use of a composite brush made with one layer of natural graphite grade and one layer of silver graphite grade may be also a good compromise to reduce both the contact voltage drop and the wear.



Key

- 1 Slip ring
- 2 Test brushes
- 3 Additional brushes
- 4 Voltmeter $V_{\sim}$ for measurement of brush total contact drop of 2 brushes
- $I_{\sim}$ AC current

Figure 17 – Test rig arrangement for AC operation with 2 brushes

5 Test schedule and operating conditions

5.1 General

This clause is relative to the general test procedure to achieve measurements of friction coefficient, voltage drop and wear.

Operating condition includes (but not limited to): the material and surface condition of the slip ring or commutator, humidity, temperature, brush pressure, current density, peripheral speed, etc.

In view of the nature of the brush material, changes within the recommended ranges of ambient conditions, etc., absolute repeatability of test results is not to be expected. If all controllable parameters are accurately maintained, repeat tests carried out on the same machine with the same brush sets shall give accuracy versus repeatability of coefficient of friction, contact drop voltage and brush wear within, say, $\pm 10\%$ for each measurement compared with the average results found on previous tests. The above remarks assume that the same test procedure has been strictly followed.

It is also suggested that sets of test brushes in various materials are reserved for machine calibration tests. Before each test, it is recommended that the connection millivolt drop be monitored and that the connections be re-made if significant changes in connection millivolt drops are found.

5.2 Environmental conditions

5.2.1 Laboratory environment

The test shall be made indoors in an environment substantially free from air currents, except those generated by heat from the sample being tested. In practice, this condition is reached when the air velocity does not exceed 0,5 m/s.

All the tests should be carried out in an atmosphere substantially free from dust, chemical vapour, etc.

5.2.2 Ambient air temperature and ring surface temperature

The ambient air temperature shall be settled to achieve the suitable ring surface temperature for a good operation of the carbon brush system.

The recommended average ring surface temperature range is from 60 °C to 80 °C. Therefore it may be necessary to run several tests to define the suitable ambient air temperature inside the room (or chamber) where the test rig is installed to achieve the ring surface temperature range specified above.

Nevertheless, for drawing comparison between brushes of the same grade family on the same test rig (slip ring dimensions and material, current configuration, etc.), the ambient temperature may not be adjusted, provided the ring surface temperature does not exceed a difference of 10 °C from the limits specified above (in other words it shall lay between 50 °C and 90 °C).

To ensure an homogenous temperature around the ring a ventilation system (or other means) may be fitted.

Ambient air temperature and average ring surface temperature shall be recorded daily during the tests and the average reported in the test report.

5.2.3 Ambient humidity

The absolute humidity HA of the test room atmosphere (or climatic enclosure) shall be between 8 g/m³ and 12 g/m³ all along the test. It shall be recorded daily and the average reported in the test report.

NOTE When an instrument for measuring relative humidity is used the absolute humidity is calculated from relative humidity HR and ambient temperature.

5.3 Operating conditions

The test conditions range listed in Table 2 are "medium" conditions likely to be met on non-specialized machines.

Table 2 – Test conditions

Symbol	Name	Unit	EG	BG	HC-CG	NG	MG ^a
v_p	Peripheral speed	m/s	25 to 55	25 to 35	10 to 30	50 to 100	10 to 40
J_B	Current density	A/cm ²	10 to 12,5	5 to 10	6 to 10	8 to 12,5	10 to 35
p	Brush pressure	kN/m ² ^b	18 to 22	18 to 22	18 to 22	13 to 18	18 to 25
^a Test conditions depend on the type of metal-graphite grade (sintered or metal impregnated) and the metal content. Generally the higher is the metal content, the lower speed and higher current density shall be used. ^b An equivalent unit is kPa. NOTE It is suggested to apply the medium current density recommended by the brush manufacturer.							

5.4 Test preparation and inspection

5.4.1 General

The following sequence shall be applied prior to the tests.

NOTE Subclause 5.6 specifies the measurements and observations to be recorded before starting the test.

5.4.2 Test rig

Prepare the test rig as indicated in Clause 4.

Instruments (and their means of recording) shall be installed in the test rig and be calibrated and/or adjusted when necessary.

5.4.3 Brush-holders

Set the specified pressures according to Table 2 in 5.3.

5.4.4 Test brushes

- The test brushes prepared according to 4.1.3 shall all be of the same grade and of the same batch number. The connection drop U_f of the test brushes shall be measured prior to testing, and brushes of similar connection drop values should be selected for test with a tolerance of not more than ± 20 %.
- Fit the test brushes to the ring. Check if the brush contact surface is matching the ring profile. Different methods exist for this operation:
 - Preferential method is the use of a non-conducting abrasive cloth.
 - Use of a separate tool where a rotating ring made of an abrasive material within the same diameter as the test ring is used to machine the brush contact surface.
 - Applying a medium silicon-oxide or aluminium-oxide stone (fitting stone) on the ring when brushes are in their boxes. In that case check if no oxide remains at the contact surface of the brush and use a grinding stone on the test ring to obtain the suitable roughness.
- Thoroughly clean the test ring, brushes and brush boxes after these operations. It is recommended to use a vacuum cleaner with a sufficient suction power. After the use of a fitting stone, attention shall be paid to the cleaning and to the brush contact surface aspect.

5.4.5 Ring roughness

The roughness Ra and peak count R_{pc} should be measured after brushes fitting and before any test. If it differs from the range defined in 4.1.2.4, a new preparation of ring surface shall be done.

5.4.6 Brush bedding

Brush bedding shall then be commenced at the specified conditions of speed and current density for the test according to Table 2 and ambient air temperature and humidity as specified in 5.2.2 and 5.2.3.

Bedding shall be continued for 24 h minimum. During this period, visual inspection and measurements shall be made as required in 5.6.4.

When the film (patina) is formed the surface temperature of the ring shall be checked. If it is out of the range disclosed in 5.2.2., then the ambient temperature shall be corrected (increased or decreased) and bedding shall be continued. This operation shall be repeated until the ring surface temperature reaches the recommended range in 5.2.2. When it is not achieved check the test rig and parameters, in particular the ventilation system.

Bedding is considered as satisfactorily concluded when:

- all brushes are fully bedded, that is, the brush surfaces are uniformly well polished, and a substantially uniform patina (skin) has been developed, and
- stable measurements have been stated according to stability criteria for each parameter (refer to each corresponding subclause).

When bedding is not completed running shall continue for 24 h. When bedding is still not satisfactory, stop and check the test rig and instruments.

5.4.7 Brushes measurement

All the brushes shall be numbered and their radial dimension r_0 measured. Check if tolerances between brush and brush-holders has not been changed during bedding operation.

It is most important that each brush be then replaced in exactly the same manner and in the same brush box it occupied in "bedding" and that the brush pressure system be replaced on the top of the brush in exactly its previous position.

5.5 Test sequence

5.5.1 Test starting

The test can start when test rig preparation is concluded as indicated in 5.4.

Testing parameters shall be settled according to Table 2 and ambient air temperature and humidity set up as specified in 5.2.2 and 5.2.3. The load current, and rotational speed shall be applied within ± 5 % of the specified values.

5.5.2 Test duration

If brush wear measurements are not required, the test shall run until stable values of ring surface temperature, friction coefficient and voltage drop are obtained.

If, however, brush wear measurement is required, this period shall be extended to 150 h at least, to determine the average brush wear with a good accuracy.

5.6 Measurements and observations

5.6.1 General

Observations and measurements in the following subclauses shall be made before and/or along the test duration and/or after the test. They shall be reported in a test report. An example is given in Annex C.

If any anomaly occurs it shall be then reported in the test report.

The test report shall not be confused with a data sheet. The test report is an internal document issued by the laboratory that have proceeded to the tests. The data sheet is an external document in which some average values or graphs are provided for a customer (machine user or manufacturer). However, it shall contain essential data (parameters and average values of measurements) to ensure a good understanding.

5.6.2 Interval between measurements

Interval between measurements shall be less than 2 h, except for brush wear measurement for which the interval shall be 50 h.

5.6.3 Before starting a test sequence

5.6.3.1 Ring

- a) run-out (specification according to 4.1.2.3);
- b) eccentricity;
- c) flat spots;
- d) ring surface film finish and patterns (according to IEC 60276:2018);
- e) roughness (specification according to 4.1.2.4);

For commutator test rings only (Figure 9):

- f) check bar section elevations: too high / too low;
- g) check bevelled edges of each bar section; confirm appropriate chamfer and no copper drag;
- h) bar section surfaces and bar-to-bar grooves shall be clean and free from any dirt (oil or dust).

NOTE Ring profile measurement (preferably on each brush track if more than one track is applied) provides a), b), c) and f).

5.6.3.2 Brush-holders

- a) brush pressure, which is determined by spring force and brush area S , shall be confirmed according to the specifications in Table 2 for the brush type and adjusted if required;
- b) brush-holder position relative to the ring should be checked as specified in 4.1.4 (radial and axial position within the ring and distance between ring and brush-holder);
- c) brush holders should be clean and free from any dirt (dust or oil);
- d) clearance between brush and holder should be checked and correct to the specifications in IEC 60136.

5.6.3.3 Brushes

- a) r_i dimension of each brush i shall be measured and reported according to their position; short brushes should be identified and changed to a new one if necessary;
- b) brush dimensions should be measured and their tolerances shall be in accordance with IEC 60136;
- c) brush axial side a shall not be skewed but shall be parallel to the slot;
- d) the brush grade shall be checked and batch number reported;
- e) all moveable parts should be free (for instance springs).

It is most important that if any brush have been removed, they should be then replaced in exactly the same brush box and in the same orientation and also that the brush pressure system shall contact the head of the brush in exactly its previous position.

5.6.4 Measurements during a test sequence

The following items shall be measured, checked and recorded periodically (for intervals see 5.6.2):

- a) ring speed (4.1.6.6),
- b) ring and brushes temperature (4.1.6.3),
- c) brushes current (4.1.6.5),
- d) friction coefficient (according to Clause 6 and 4.1.6.1),
- e) voltage drop (according to Clause 7 and 4.1.6.2),
- f) brush length, when required (see 4.1.6.4 and Clause 8).

The load current and rotational speed shall be maintained within ± 5 % of the specified values. Parameters shall be re-adjusted periodically if necessary.

If an operation is performed on the ring surface then the brush seating / bedding should be checked and corrected if necessary.

During the test sequence close observation shall be made to ascertain that no abnormal brush performance occurs (chattering, ring grooving, sparking, ring blackening, excessive ring surface temperature, abnormal current distribution between brushes, etc.). These phenomena can adversely affect the test. If any of the parameters show an instability, stop the test and check again the test rig and operating parameters. This inspection shall be done almost once a day.

5.6.5 Measurements after a test sequence

At the end of the test, when the machine has stopped, the following items shall be inspected and recorded:

- a) brush aspect (in particular contact surface): the description shall be according to 5.7 of IEC 60276:2018 and a picture shall be taken,
- b) ring surface aspect: the description shall be in accordance with 5.6 of IEC 60276:2018 and a picture shall be taken,
- c) ring roughness (R_a and RP_c),
- d) when brush wear measurement is required: measurement of the dimension r_i of each brush i .

6 Determination of friction coefficient

6.1 General

Friction coefficient μ is involved in mechanical losses of brushes, which may be calculated from formula (13):

$$P_m = 10 \times \mu \times v_p \times F_p \quad (13)$$

where:

- P_m is the mechanical losses;
- μ is the friction coefficient;
- v_p is the peripheral speed;
- F_p is the force applied by the pressure system.

In formula (13) the term "10" is from the constant of gravity. For precise calculation it may be replaced by its exact value: 9,807.

Friction coefficient is affected principally by the speed, the specific pressure, the current density and the brush grade.

There are two main methods by which the coefficient of friction is usually measured:

- Method a): measurement of the tangential forces acting on the rotating surface (see 4.1.6.1.2);
- Method b): measurement of the tangential forces acting on the brush (see 4.1.6.1.3).

NOTE Although there may be differences in the coefficient of friction due to the anodic and cathodic brushes, these are generally added together and only the average friction due to both brushes is calculated.

6.2 Test conditions

The test shall be carried out according to operating condition specified in 5.2 and 5.3.

As friction coefficient is speed dependant, test shall be repeated with 5 different speeds within the range specified in Table 2. The interval between two adjacent speed shall give an accurate plotted curve of friction coefficient versus speed (see example in Figure 18).

When a dependence to the current density is expected the whole test sequence may be repeated at different current density within the range of Table 2.

6.3 Measurements

6.3.1 General

Test conditions parameters shall be controlled during the test and reported together with the other measurements and observations according to 5.6.

The measurement of friction coefficient shall be recorded at stationary operating conditions during the test duration according to 5.5.2.

6.3.2 Test rig arrangement of Method a)

When using the instrumentation according to Method a) two measurements are necessary:

- Measurement of T_0 : remove carbon brushes and measure the torque at specified peripheral speed.
- Measurement of T_m : set the brushes on the test rig and record the values of torque along the test duration.

6.3.3 Test rig arrangement of Method b)

When using the instrumentation according to Method a) the force measured by the sensor $F_{t,lc}$ (see Figure 7) shall be recorded along the test duration.

6.4 Calculation of friction coefficient

6.4.1 Test rig arrangement of Method a)

When using the instrumentation according to Method a), the the friction coefficient is calculated from the measured torques by using formula (14):

$$\mu = \frac{T_m - T_0}{F_p \times \frac{D}{2}} \quad (14)$$

where:

T_m is the torque measured by the couple meter;

T_0 is the torque measured by the couple meter without carbon brushes;

D is the diameter of the ring;

F_p is the force applied on the brush by the pressure system.

NOTE 1 Details of calculation are described in Annex A, Clause A.1.

NOTE 2 For results demanding higher accuracies, inherent driving motor losses could be taken into account when calculating the coefficient of friction.

6.4.2 Test rig arrangement of Method b)

F_t is directly calculated from the output voltage of the load cell. The adjustment of the sensor and calculation are described in Clause A.2.

F_N (the total normal force on all brushes) is determined from the pressure applied by the pressure system, determined by formula (15):

$$F_N = N_B \times t \times a \times p \quad (15)$$

where:

N_B is the number of brushes;

p is the pressure;

t, a are the dimensions of the brush.

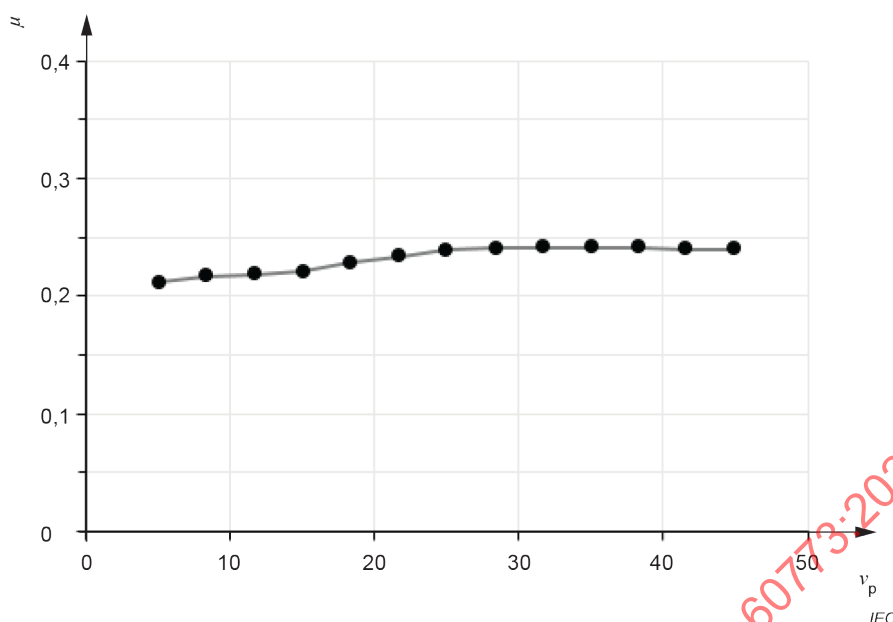
NOTE When p is in gf/cm^2 and t, a in cm it gives F_N in gram-force. To convert into SI unit: multiplication by $9,807 \times 10^{-3}$ gives F_N in newtons.

Therefore the friction coefficient μ is calculated from formula (16) when F_N and F_t are expressed within the same units (either grams or newtons):

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} = \frac{F_t}{N_B \times t \times a \times p} \quad (16)$$

6.5 Report

The friction coefficient is reported in a table or a graph as per Figure 18 together with the test conditions parameters.



Key

v_p Peripheral speed, in m/s

μ Friction coefficient

Figure 18 – Example of friction coefficient μ graph as a function of peripheral speed v_p

NOTE This graph is an example for a brush grade of electrographite type.

7 Determination of voltage drop

7.1 General

Electrical losses from brushes may be important for electrical rotating machines since it can cause overheating of brushes, brush-holders and commutators or rings. The cooling system of the machine shall be designed based on total losses, including brush electrical losses.

Electrical losses from brushes can be determined by the total voltage drop of brushes installed on the machine and by the current.

The total voltage drop U_B from the brush terminal to the slip ring or commutator is a complex parameter which is made up from the sum of the voltage drops shown in Figure 3:

$$U_B = U_c + U_i + U_f + U_s \quad (17)$$

Some of these voltage drops are not necessarily ohmic, in particular the brush contact drop U_c .

The total voltage drop U_B is measured and calculated according to 7.3.2 and 7.4.1.

Brush contact voltage drop may be useful for comparison of brush grades, since it does not depend on the brush design (cable and tamping are excluding), and is affected by the testing condition, including environmental parameters.

The brush contact voltage drop may be determined by a direct measurement method, according to 7.3.3, or by calculation from U_B , according to 7.4.2.3.

When brushes carry direct current, a difference in contact drop voltage may generally be observed between anodic and cathodic brushes and the slip ring or commutator.

When brushes carry alternating current, these differences between contact drop voltages will not exist.

7.2 Test conditions

The test shall be carried out according to operating condition specified in Table 2.

As voltage drop is current dependant, test shall be repeated with minimum 5 different currents within the range specified in Table 2. The interval between two adjacent currents shall give an accurate plotted curve of voltage drop versus current density (see example in Figure 19).

When a dependence to the speed is expected the whole test sequence may be repeated at different speed within the range of Table 2.

7.3 Measurements

7.3.1 General

Test conditions parameters shall be controlled during the test and reported together with the other measurements and observations according to 5.6.

The measurement of voltage drop shall be recorded at stationary operating conditions during the test duration according to 5.5.2.

Depending on the brush arrangement, as specified in 4.2.4 for commutators or 4.3.4 for slip rings, the voltage drop of single brushes or group of brushes is directly measured.

7.3.2 Brush total voltage drop U_B

The total brush voltage drop is measured between:

- the brush terminal, by using brush probe type 1) described in 4.1.6.2.4.2,
- and
- the ring, by using the ring probe described in 4.1.6.2.3.

7.3.3 Brush contact voltage drop U_c

When the direct measurement method is applied, the contact brush voltage drop is measured between:

- the point of the brush which is at a distance of 5 mm from the ring, by using brush probe type 2) described in 4.1.6.2.4.3,
- and
- the ring, by using the ring probe described in 4.1.6.2.3.

When it is calculated, the brush total voltage drop is measured along the test (see 7.4.2.3 for the calculation).

7.4 Calculation

7.4.1 Brush total voltage drop U_B

7.4.1.1 For DC operation

When using test rig arrangement according to 4.2.3 (commutator application) or 4.3.4.1 (slip ring application with DC current), the total voltage drop on each polarity (- and +) is directly measured. Therefore U_B is calculated simply from formula (18):

$$U_B = \frac{U_{B,-} + U_{B,+}}{2} \quad (18)$$

where

$U_{B,-}$ is the average of total voltage drop of negative brushes;

$U_{B,+}$ is the average of total voltage drop of positive brushes.

7.4.1.2 For AC operation

When using test rig arrangement according to 4.3.4.2 (slip ring application with AC current), U_B is the average of total voltage drop $U_{B,i}$ of each brush i as per formula (19):

$$U_B = \frac{1}{N_R} \times \sum_{i=1}^{N_R} U_{B,i} \quad (19)$$

where N_R is the number of brushes per ring.

7.4.2 Brush contact voltage drop U_C

7.4.2.1 General

The brush contact drop U_C is calculated from the contact voltage drop $U_{C,i}$ of each brush i by the same manner as for the total brush contact drop (see 7.4.1). The contact voltage drop $U_{C,i}$ of each brush may be obtained by direct measurement (7.4.2.2) or by calculation (7.4.2.3).

7.4.2.2 Direct measurement method

The contact voltage drop $U_{C,i}$ of each brush i is directly measured. Then the brush contact drop U_C is calculated by the same manner as for the brush total contact drop described in 7.4.1.

7.4.2.3 Calculation method

The contact voltage drop $U_{C,i}$ of each brush i is calculated from the brush total voltage drop $U_{B,i}$ and the brush non-contact resistance by formula (20):

$$U_{C,i} = U_{B,i} - (U_{i,i} + U_{f,i} + U_{s,i}) \quad (20)$$

where:

$U_{B,i}$ is the brush i total voltage drop, which is directly measured by applying the method described in 7.3.2,

$U_{s,i}$ is the shunt voltage drop of brush i , which is determined before the test by measurement (for example by using same instruments as specified in IEC 60136 for the measurement of $U_{f,i}$),

$U_{f,i}$ is the connection drop of brush i , which is determined before the test by measurement according to the method detailed in IEC 60136,

$U_{i,i}$ is the brush internal drop of brush i , which is determined before the test by calculation from its grade resistance $R_{p,i}$ and from the current I by formula (21):

$$U_{i,i} = R_{p,i} \times I \quad (21)$$

The determination of $U_{s,i} + U_{f,i} + U_{i,i}$ depends on the expected values of $U_{s,i}$ and $U_{i,i}$:

a) When $U_{s,i}$ and $U_{i,i}$ are not negligible:

There are two methods for the calculation of $U_{s,i} + U_{f,i} + U_{i,i}$:

- Measurement of the sum: the method is using the test apparatus from IEC 60136 in which the first probe is applied on the terminal and the second probe is applied to the brush body located near to the brush contact surface (for instance 5 mm above the sliding surface as specified in 4.1.6.2.4.2). In view of the negligible errors introduced the effect of temperature rise may be ignored.
- Measurement of each term: $U_{s,i} + U_{f,i}$ may be measured as specified in the above paragraph and $U_{i,i}$ is calculated from the brush internal resistance per formula (21).

b) When $U_{s,i}$ and $U_{i,i}$ are negligible:

The shunt is generally made of copper or higher conductive metal (tin or silver plated copper), therefore $U_{s,i}$ may be considered as negligible.

Depending on brush grade type and resistivity, $U_{i,i}$ may be considered as very low compared to $U_{f,i}$.

Therefore formula (20) becomes formula (22):

$$U_{c,i} = U_{B,i} - U_{f,i} \quad (22)$$

Example: Brush internal voltage estimation with a brush of r dimension of 50 mm and a cable diameter of 5 mm:

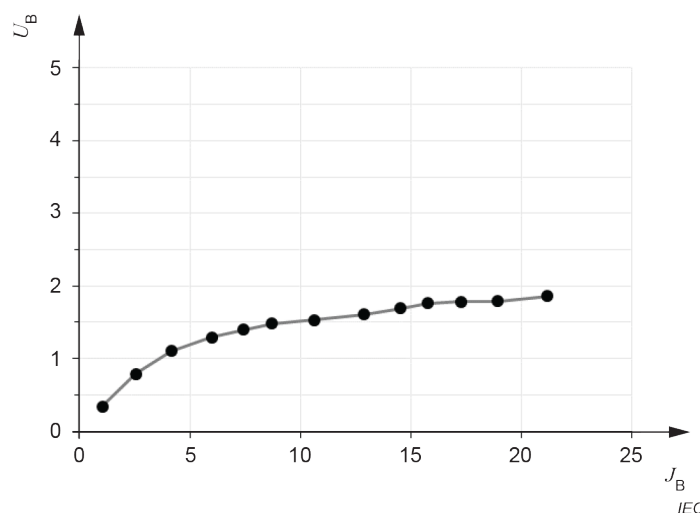
Material 1: EG with a resistivity of 5 000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (50 $\mu\Omega\cdot\text{m}$) – calculated U_i is 5 000 $\times$ 5 = 25 000 $\mu\Omega$ = 25 m Ω . U_f is about 200 m Ω , which is quite higher than U_i . It means that U_c is calculated from formula (22) according to item b) of present subclause.

Material 2: BG with a resistivity of 50 000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (500 $\mu\Omega\cdot\text{m}$) – calculated U_i is 50 000 $\times$ 5 = 250 000 $\mu\Omega$ = 250 m Ω . U_f is about 450 m Ω , which is comparable to U_i . Therefore the calculation is done according to item a) of present subclause.

If a greater accuracy is required, for a high resistivity material (larger than 100 $\mu\Omega\cdot\text{m}$), a correction of U_c may be made to take account of the voltage drop between the probe location and the contact surface.

7.5 Report

The voltage drop is reported in a table or plotted, as illustrated by Figure 19, with mention of test conditions parameters.



Key

U_B Brush total voltage drop, in mV

J_B Brush current density, in A/cm²

Figure 19 – Example of brush total voltage drop U_B graph as a function of current density J_B

NOTE This example concerns an electrographite grade within a low resistivity.

8 Determination of brush wear

8.1 General

Brush mean wear rate $\overline{WR}$ is defined as the absolute average wear of test brushes per unit of time. It is calculated from the measurement of each brush length according to 4.1.6.4. Details about calculation are explained in 8.4.

It is a characteristic of brush material and brush design, affected by electrical, mechanical and external conditions. Therefore brush wear values derived from the method described in this clause shall be considered carefully when interpreted and may be differ from brush wear rate in the field (on the application). Generally this test aims to be carried out on different grades within the same conditions in the view point of their comparison.

8.2 Test conditions

The test shall be carried out according to operating condition specified in 5.2 and 5.3.

8.3 Measurements

Test conditions parameters shall be controlled during the test and reported together with the other measurements and observations required in 5.6.

The test shall be stopped minimum every 50 h in order to check the evolution of brush wear. The brush length is then measured with instruments specified in 4.1.6.4.

Measurements of brush length r_i should be made at precisely the same position on the brush or a line parallel to the r axis using, if possible, the same measuring instrument, or otherwise an instrument of the same accuracy.

Of course an equipment capable of measuring the brush wear continuously (i. e. all along the test duration) may be applied. In that case there is no need to stop the machine and the brush wear evolution would be easier to display.

8.4 Calculation of brush wear

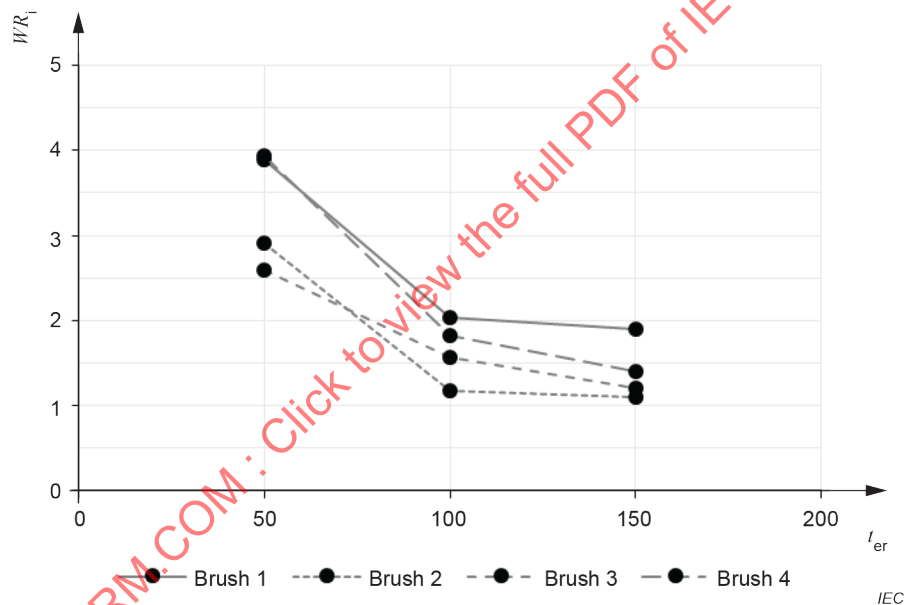
The brush wear Δr_i of each brush i at each measurement time shall be calculated by applying formula (9) defined in 3.1.28.

Therefore the brush wear rate WR_i for each brush i is calculated (commonly expressed as brush wear velocity) from formula (10) defined in 3.1.29.

Generally it is expressed in mm/1 000 h (mm of brush wear per 1 000 effective running hours) when the result of formula above is multiplied by 1 000.

The brush wear rate of each brush is then plotted in a graph for interpretation. Figure 20 is an example of brush wear rate as a function of time.

NOTE 1 The evolution of each brush wear can be also displayed in a graph for interpretation.



Key

t_{er} effective running time, in h

WR_i wear rate of brush i , in mm/1 000 h

Figure 20 – Example of brush wear rate WR_i of brushes during the test for a test rig with 4 brushes

Then the mean wear rate $\overline{WR}$ shall be calculated from the average of brush wear rate of all brushes with formula (23):

$$\overline{WR} = \frac{1}{N_B} \times \sum_{i=1}^{N_B} WR_i \quad (23)$$

In another way the mean wear rate may also be directly calculated from the mean brush wear and the effective running time by applying formula (24).

$$\overline{WR} = \frac{\overline{\Delta r}}{t_{er}} \quad (24)$$

where $\overline{\Delta r}$ is the mean wear of test brushes during the test (mm) according to formula (25):

$$\overline{\Delta r} = \frac{1}{N_B} \times \sum_{i=1}^{N_B} \Delta r_i \quad (25)$$

NOTE 2 In literature brush wear is sometimes expressed as a volumetric or linear brush wear.

- The brush volumetric wear rate $\overline{WR}_{vol}$ is expressed in m³/m by formula (26):

$$\overline{WR}_{vol} = \frac{\overline{\Delta r}}{l_{er}} \times S \quad (26)$$

where:

- S is the brush contact area, in mm² (it shall be kept in mind that, when a bottom angle is applied, S may differ from the cross-section area $t \times a$).
- $\overline{\Delta r}$ is the average wear of test brushes, in mm
- l_{er} is the distance travelled by the track under the brush, in mm, calculated as per formula (27):

$$l_{er} = t_{er} \times v_p \quad (27)$$

- The brush linear wear rate is calculated from formula (28) when the cross-section of the brush is considered constant (simplification of formula (26)):

$$\overline{WR}_{lin} = \frac{\overline{\Delta r}}{l_{er}} \quad (28)$$

In practice it is expressed in mm/km (mm of brush wear/running distance km) or mm/10 000km (specific for traction machines).

NOTE 3 This test does not apply to routine testing of the machines.

8.5 Report

The mean wear rate $\overline{WR}$ is reported in a table in the test report with mention of test conditions parameters. The brush wear rate WR_i for each brush i may be also reported in a graph (see Figure 20).

9 Determination of commutation ability of brush grades by a specific black-band test on a DC machine

9.1 General

This clause describes the black-band test method and the interpretation for the result, from the view point of the determination of commutation ability of brush grades, while in Clause 7 of IEC 60034-19:2014, the determination of black-band zone is specified from the view point of the commutation ability of newly manufactured DC machines for one of the specific test method for DC machines.

The black-band test is to determine the limits of over- or under- commutation, between which sparkless commutation is attainable for load currents up to and including rated current, where, in order to vary the commutation magnetic field, a low voltage additional generator is connected in parallel to the commutating-pole winding, as specified in IEC 60034-19.

With using the black-band test, not only commutation ability, namely injurious spark suppression ability, which is related to the brush contact resistance, in terms of brush contact drop, but also the mechanical contact ability, which is related to the friction coefficient, can be verified, when compared with the reference brush grade.

9.2 Set-up

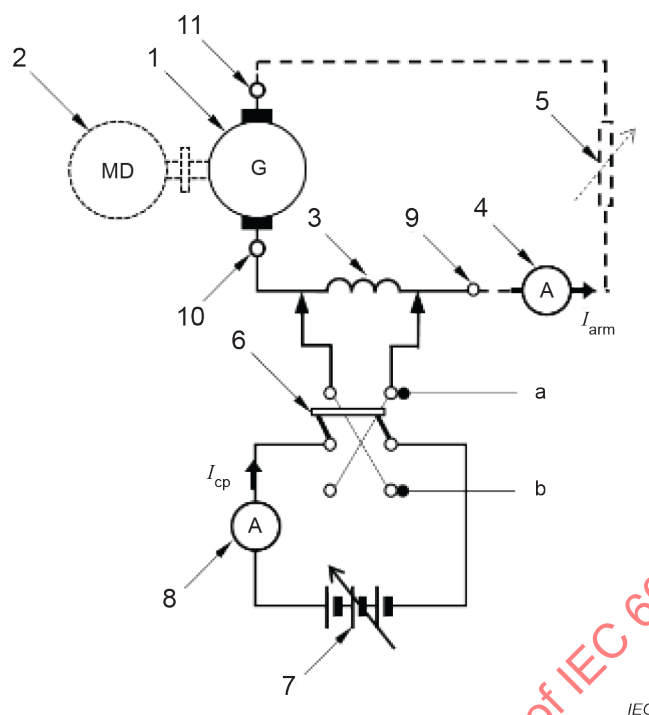
The black-band test is basically in accordance with IEC 60034-19:2014, Clause 7. However other circuit configurations are also recommended for the determination of commutation ability of brush grades.

One simple circuit configuration uses the tested DC machine as a generator and a variable resistance for loading, as shown in Figure 21.

In case of Figure 21 circuit configuration, even though the circuit configuration is very simple, which will yield economical merits, rotational speed will slightly decrease along with load rise due to the load-speed regulation characteristics of the prime mover motor.

Black-band curves (see Figure 23) are obtained by switching the position of the polarity exchanger 6.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021



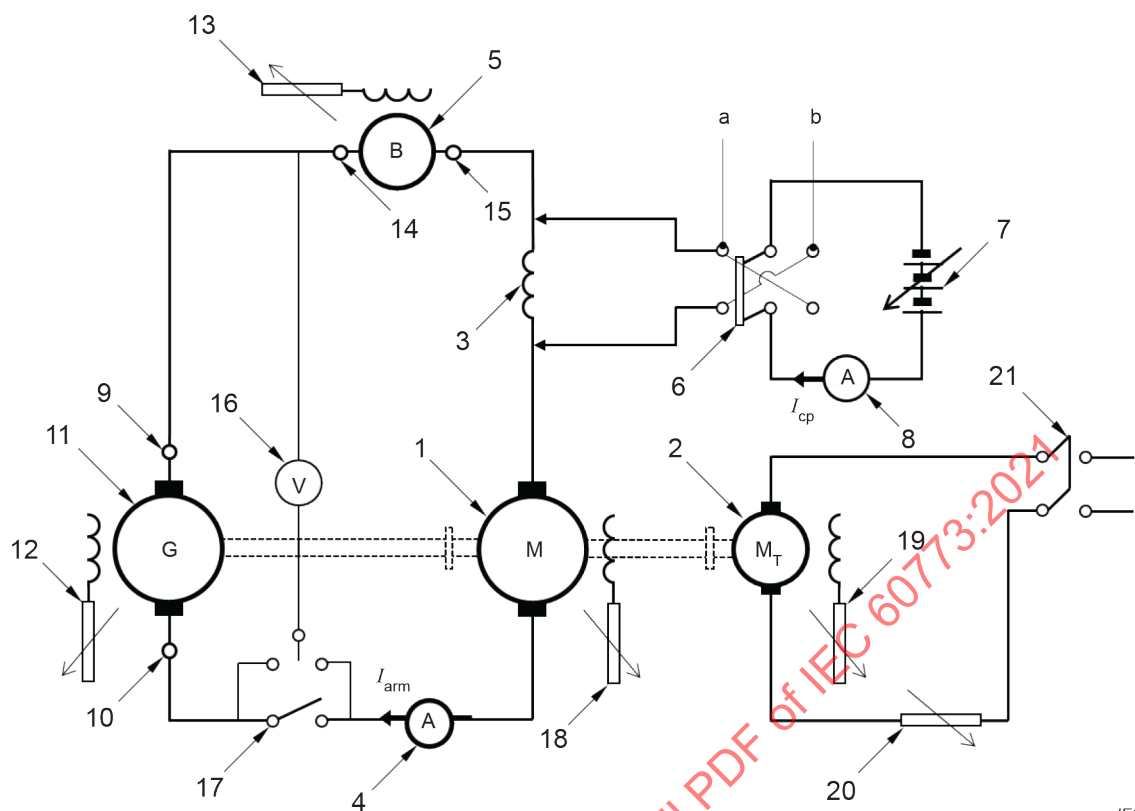
Key

I_{arm}	Armature current	5	External resistor for adjusting current
I_{cp}	Commutation and compensation winding current	6	Polarity exchanger:
		a	Boost position
		b	Subtract position
1	Tested generator G	7	DC voltage source
2	Driving motor MD	8	Ammeter for measuring I_{cp}
3	Commutation and compensation winding	9	Commutation and compensation winding terminal
4	Ammeter for measuring I_{arm}	10	Generator terminal (+)
		11	Generator terminal (-)

NOTE Commutation and compensation winding is also called C+C.

Figure 21 – Black-band test circuit configuration using DC generator and resistance load

For more accurate black-band test, loading back test circuit configuration may be applied. Figure 22 shows the black-band test circuit configuration using Brondell's loading back circuit, in which it is more accurate and easier to set-up rotational speed, load current and terminal voltage.



IEC

Key

I_{arm}	Armature current	11	Loading-back generator GL
I_{cp}	Additional commutation poles current	12	Field circuit for equalizing induced EMF
1	Tested motor M	13	Field circuit for adjusting load current
2	Starting motor MT	14	Booster terminal (-)
3	Commutation and compensation winding	15	Booster terminal (+)
4	Ammeter for measuring I_{arm}	16	Voltmeter for checking induced
5	Booster for adjusting current	17	Load-on switch EMF of motor or generator
6	Polarity switch:	18	Field circuit for Motor M field weakening
a	Subtract position	19	Field circuit for starting motor
b	Boost position	20	Starting resistor
7	DC voltage source	21	Starting motor start switch
8	Ammeter for measuring I_{cp}		
9	Loading generator GL terminal (+)		
10	Loading generator GL terminal (-)		

Figure 22 – Black-band test circuit configuration for Brondell's loading-back method

NOTE 1 For the loading-back DC generator GL rating is identical or almost identical to the tested motor M.

NOTE 2 The booster DC generator B has a low rated voltage for supplying load losses for both M and G.

NOTE 3 Starter DC motor MT is for building up the rotational speed for the loading back system and for supplying no load losses for both M and G for the loading back system.

NOTE 4 Figure 21 and Figure 22 are only the figures which illustrate the principle of the black band test. For the actual circuit, usually a protection system is added, such as a High Speed Circuit Breaker (HSCB), to avoid over current, and a winding temperature sensor, to avoid overload operation.

NOTE 5 The DC battery power source "7" can be alternated to the semiconductor DC power source, with which DC reactor is added in series in order to avoid current ripple.

9.3 Test procedure

9.3.1 Preparation of the test

Prior to the test the DC motor shall be inspected according to IEC 60034-19 to avoid any perturbation (in particular windings).

Beforehand a black-band test commutator, brush-holders and brushes shall be prepared and inspected according to 5.4 to ensure the black-band test quality, especially current condition. When necessary a picture shall be taken to record patterns and conditions.

The following additional items (specific for black-band test) shall be checked:

a) Commutator

- 1) position of mica between adjacent bars: it shall sink below the commutator bar surface (without any "high mica" or "side mica");
- 2) commutator bars chamfering: chamfers shall be properly cut off and without any copper flaking at the chamfered corner.

b) Brush arrangement

Brush arm pitch between adjacent pole brush arms: to ensure the equal brush current distribution (i.e. distance between adjacent pole brush arms shall be equidistant).

c) Brush neutral

The brush arrangement should be set for brush neutral with the position clearly marked.

The preferred method is:

The neutral is set with the brushes fully seated by applying 100-240 V AC to the shunt fields, and measuring the AC voltage between the brush holders of opposite polarity.

The brush holder assembly should be moved to obtain the lowest induced voltage. If the induced voltage cannot be set to 10 mV or less, the brush spacing, seating, or field polarity should be checked.

d) Commutating pole air gap

If the machine has back air gap then the thickness of the non-magnetic liners and their position should be checked.

9.3.2 Operating conditions and test sequence

Prior to the black-band test, the machine equipped with the tested grade brushes shall run at nominal speed and nominal current I_N in order to ensure bedding of brushes and formation of patina as specified in 5.3 (therefore proper bedding and patina formation are to be checked before starting the BB test). All along the test excitation voltage of the motor shall be kept at its nominal value.

In the following, the spark levels refer to items 801 (1) to 808 (8) of IEC 60276:2018. The sparking level could be assessed with more accuracy by measuring the commutation signal in the high frequency component of the armature voltage by oscilloscope or by using a spark detector apparatus.

When the loading black-band test circuit configuration is applied, the test sequence comprises the following steps:

a) Initial conditions:

- Set DC motor and generator at rated voltage;
- Set armature current I_{arm} of the DC motor at rated current;

The current in compensating commutating winding should be at its nominal rated condition $I_{cp}(0)$ (without any boost or subtract).

- b) Decrease armature current I_{arm} at 25 % of nominal current and put the position of switch 6 to the subtract position b.
- c) Decrease commutation poles current I_{cp} .
 - While decreasing, check sparking level according to IEC 60276:2018 (at the beginning no sparks, which means that spark level is 1);
As soon as sparks appear (sparking level ≥ 2), record armature current and commutation poles current $I_{cp}(c)$ (by using respective ammeters 4 and 8 of Figure 21 or Figure 22);
 - Continue to decrease commutation poles current I_c in order to confirm that the sparking condition is maintained.
- d) Increase commutation poles current I_{cp} by decreasing the subtract current.
 - While increasing, check the sparking level;
 - As soon as sparks disappear (the sparking level is 1), record armature current and commutation poles current $I_{cp}(d)$.
- e) Continue to increase commutation poles current I_{cp} .
 - While increasing, check sparking level with characterization of sparks;
 - As soon as sparks appears again (sparking level ≥ 2), record the armature current and the commutation poles current $I_{cp}(e)$;
 - Move the position of switch 6 to the boost position a.
- f) Decrease commutation poles current I_{cp} by decreasing the boost current.
 - While decreasing, check the sparking level;
 - As soon as the sparks disappears (the sparking level is 1), record the armature current and the commutation poles current $I_{cp}(f)$.
- g) Repeat steps b) to f) for armature current: 50 %, 75 % and 100 % of nominal, respectively.

At the end of the test, record items according to 5.6.5.

9.4 Black-band graph

The method for plotting the boost / subtract current for each armature current is illustrated by the example of Figure 23.

For each sequence part (subtract and boost) each plot is defined by the average of the measurements of commutation pole current divided by the nominal commutation pole current $I_{cp}(0)$.

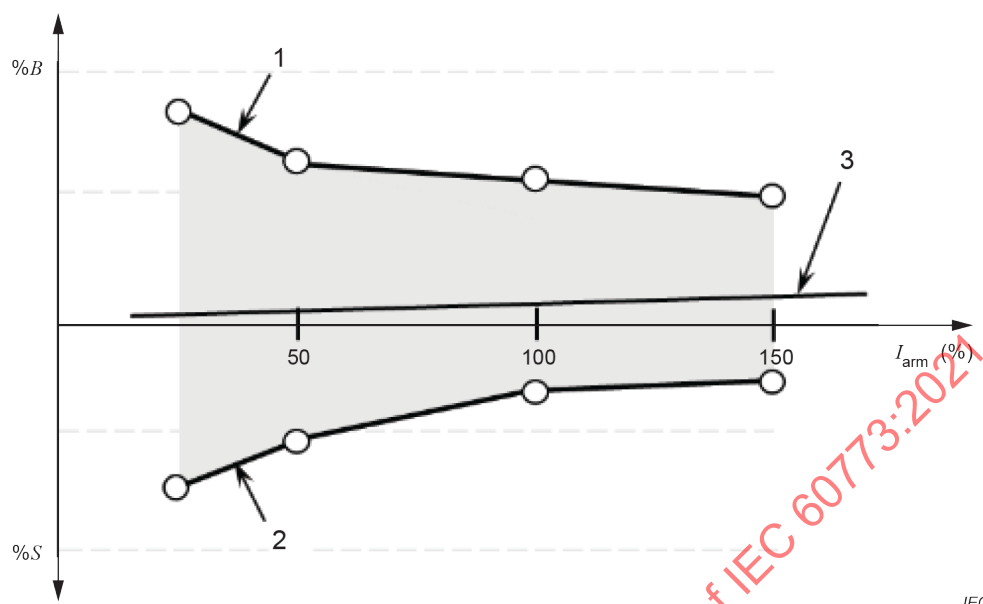
For curve 1 the retained value of I_{cp} is the average of $I_{cp}(e)$ and $I_{cp}(f)$ given by formula (29):

$$\%Boost = \left(\frac{I_{cp}(e) + I_{cp}(f)}{2 \times I_{cp}(0)} \right) \quad (29)$$

For curve 2 the retained value of I_{cp} is the average of $I_{cp}(c)$ and $I_{cp}(d)$ given by formula (30):

$$\%Subtract = \left(\frac{I_{cp}(c) + I_{cp}(d)}{2 \times I_{cp}(0)} \right) \quad (30)$$

The center line 3 is obtained by calculation of the average value between *%Boost* and *%Subtract* of each measurement point.



Key

I_{arm} Armature current

%B *%Boost*

%S *%Subtract*

1 Curve for *%Boost*

2 Curve for *%Subtract*

3 Black-band centre line

Figure 23 – Determination of black-band zone for a specified constant speed of rotation

[SOURCE: IEC 60034-19:2014, Figure 6]

NOTE Subtract is also commonly named back, especially in USA.

9.5 Interpretation

9.5.1 General

The black-band zone can be analysed and interpreted in terms of both black-band width and black-band centre line.

The black-band width is an index for commutation stability, which is sometimes called "commutation ability". If the test DC machine is fixed, then commutation ability for specific brush grade or specific brush gear assembly, can be verified by the black-band width, as a comparative estimation with already known brush grade or with already known brush gear assembly. If the brush grade and brush gear assembly are fixed, then commutation ability for specific DC machine can be verified by the black-band width.

The black-band centre line is basically an index for the inter-pole magnetic field strength, which is to be adjusted by DC machine manufacturers, at their factory test. However, if brushes with inadequate contact area due to poor brush bedding or due to poor brush seating, are applied to the black-band test, then the black-band centre line will be inclined with right side upward, as if the inter-pole magnetic field strength were weak.

In following subclauses, important cases of the black-band zone graphs encountered in practice are described, considering commutation ability verifications for specific brush grade or specific brush assembly:

- 9.5.1: influence of commutator patina thickness of thick / thin on the black-band zone;
- 9.5.2: influence of brush contact resistance;
- 9.5.3: black-band zone after long time operation.

Informative Annex B explains practical cases where black-band figure is not influenced by the brush grade itself but inadequate preparation or arrangement:

- Clause B.1: Black-band zone in case of inadequate contact area due to inadequate brush bedding or brush seating;
- Clause B.2: Influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone;
- Clause B.3: Black-band zone hysteresis between increased I_{arm} and decreased I_{arm} .

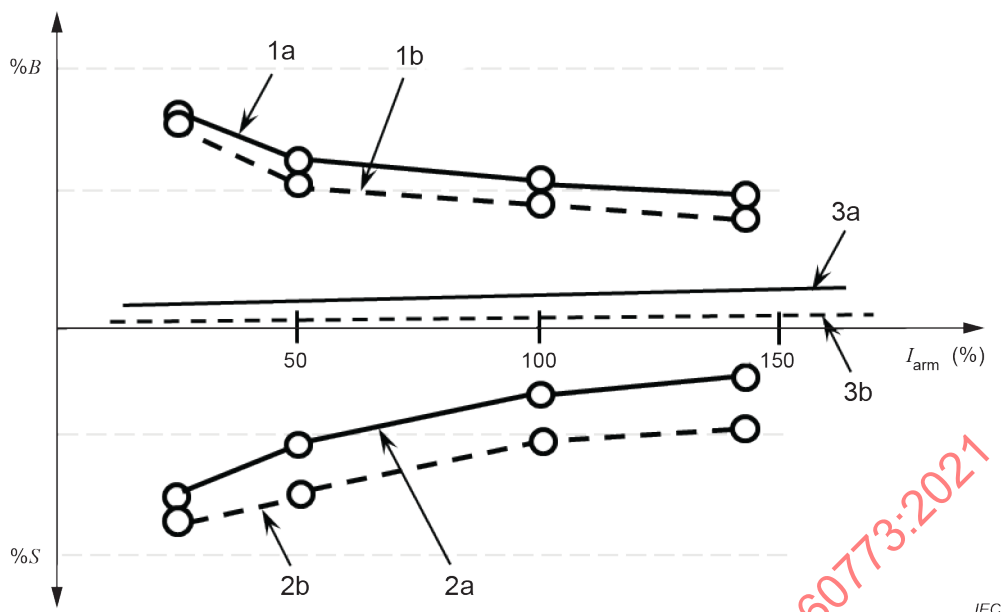
9.5.2 Influence of commutator skin thickness on the black-band zone

The black-band zone consists of both an upper side boundary, which is called "over commutation side boundary", and a lower side boundary, which is called "under commutation side boundary".

According to the manufacturer's factory test experiences, in case of a thick commutator skin, compared with that of thin commutator skin, the "under commutation side boundary" shifts upward heavily with load, while the "over commutation side boundary" is kept unchanged, resulting in black-band width decrease with load increase.

In this case, the black-band zone centre is inclined with right hand side upward, therefore, the inter-pole magnetic field is only apparently weakened.

Figure 24 shows influence of commutator skin thickness of thick / thin on the black-band zone.



Key

I_{arm}	Armature current
%B	%Boost
%S	%Subtract
1	Curve for %Boost
2	Curve for %Subtract
3	Black-band centre line
a	Thick skin
b	Thin skin

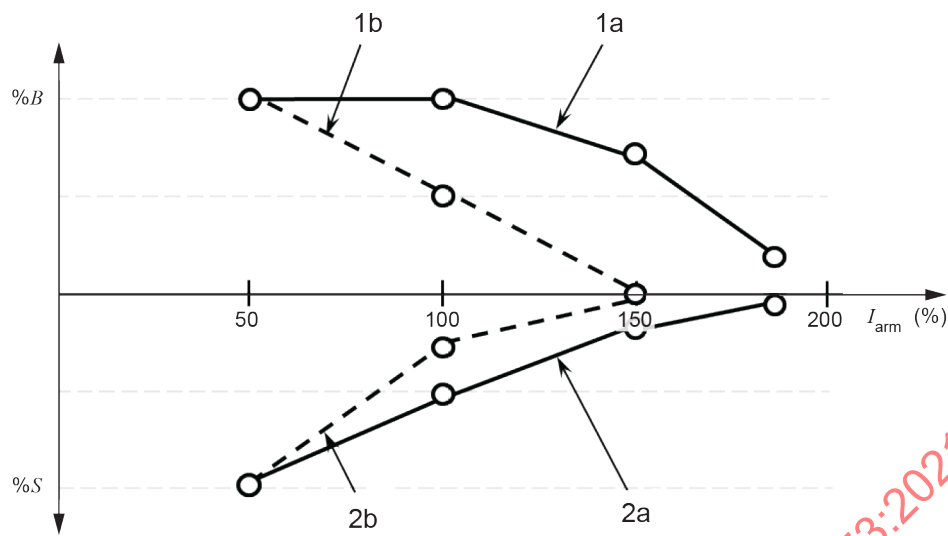
Figure 24 – Influence of commutator film thickness on the black-band zone

9.5.3 Influence of brush contact resistance

Higher contact resistance brush suppresses (or at least decreases) the short circuit current in the commutation circuit, which causes the commutation sparks.

Therefore, the black-band width for higher contact resistance brush is generally wider than that for lower contact resistance brush as is shown in Figure 25 and Figure 26, respectively for a motor and a generator. In addition the black-band width decrease along with load increase is also important for the brush grade evaluation.

In case of Figure 25, for a high contact resistance brush, sufficient black-band width remains even for 150 % load, while for a low contact resistance brush, black-band is almost non-existing for 100 % load.

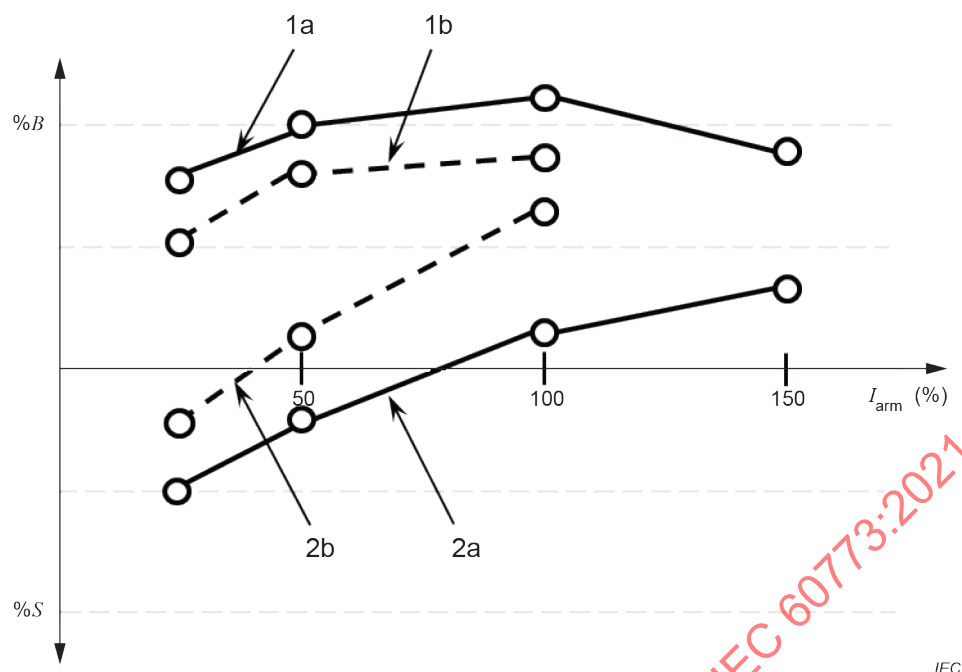


IEC

Key

I_{arm}	Armature current	1	Curve for %Boost
%B	%Boost	2	Curve for %Subtract
%S	%Subtract	a	High contact resistance grade
		b	Low contact resistance grade

Figure 25 – Comparison of black-bands for a high contact resistance brush and a low contact resistance brush in case of a motor



Key

I_{arm} Armature current

%B %Boost

%S %Subtract

1 Curve for %Boost

2 Curve for %Subtract

a High contact resistance grade

b Low contact resistance grade

Figure 26 – Comparison of black-bands for a high contact resistance brush and a low contact resistance brush in case of a generator

9.5.4 Estimation of mechanical contact stability deviation by comparing the black-band figures before and after longtime critical operation

For Figure 25, the relative black-band width for either high contact resistance brush or low contact resistance brush, is generally considered as proportional to the total brush voltage drop, that is to say the total resistance of the brush, including its internal resistance (which is specific for the brush grade). In this case the black-band width is determined by only the electrical origin.

However, in some cases, it is known that the mechanical origin, namely mechanical contact smoothness or mechanical contact stability, is more dominant to determine the black-band width.

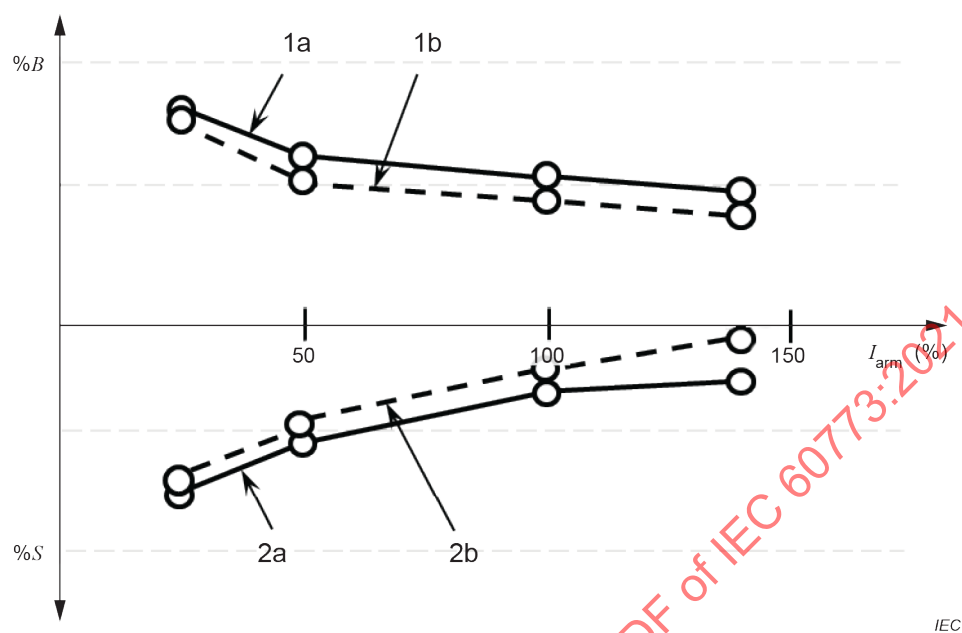
The application of longtime critical operation, such as:

- repetitive peak load operation,
- continuous no-load operation,
- repetitive rapid acceleration and deceleration,

is effective to evaluate the practical operation performances for specific brush grade.

If the black-band tests are applied before and after the critical operation, the mechanical contact stability deviations can be found by comparing the black-band results of before and after.

Figure 27 and Figure 28 show the black-band figure deviation of before and after the critical operation of repetitive peak load application of 225 %, for respectively a "strong" grade and a "weak" grade.



Key

I_{arm} Armature current

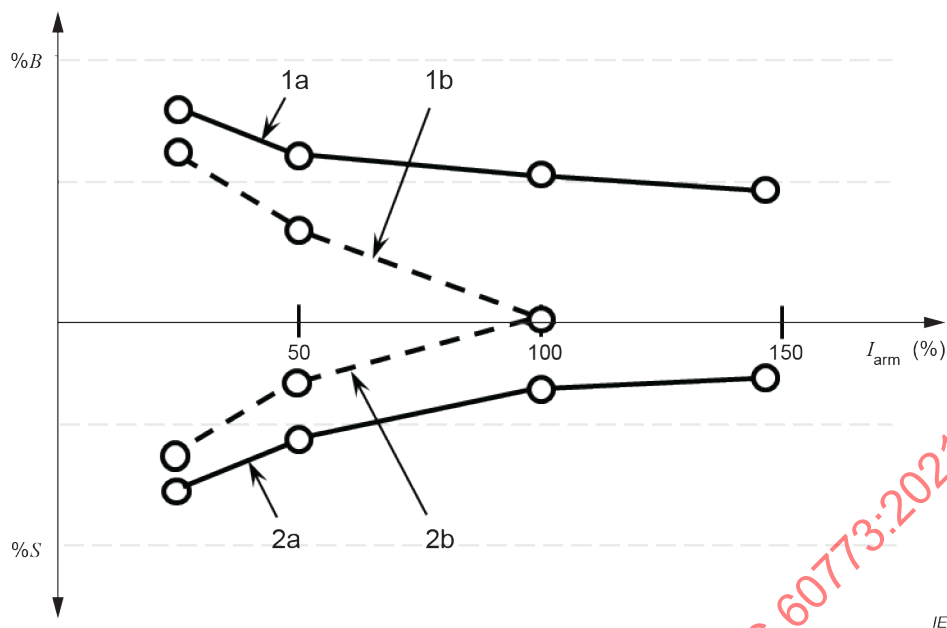
%B %Boost

%S %Subtract

a Initial BB test

b BB test after 1 h of critical operation

Figure 27 – Black-band figure deviation of before and after the critical operation of repetitive peak load application of 225 %, for a "strong" grade



Key

I_{arm} Armature current

%B %Boost

%S %Subtract

a Initial BB test

b BB test after 1 h of critical operation

Figure 28 – Black-band figure deviation of before and after the critical operation of repetitive peak load application of 225 %, for a "weak" grade

It is apparent that for the "weak" grade in Figure 28, mechanical stability deviation can be estimated to be non-existent, as a result of observation for the black-band figures of before and after, even though the critical operation was applied to the grade.

Annex A (informative)

Additional information for friction coefficient measurement

A.1 Details of calculation of friction coefficient by using method a) of 4.1.6.1.2

Two measurements are done:

- Measurement 1: carbon brushes removed, the measured torque T_0 is:

$$T_0 = T_{\text{bearing}} + T_{\text{friction}} + T_{\text{windage}} \quad (\text{A.1})$$

- Measurement 2: with carbon brushes installed, the measured torque T_m is:

$$T_m = T_0 + T_{\text{brushes}} \quad (\text{A.2})$$

As it can be seen from formula (A.1) and (A.2), the torque T_{brushes} due to friction losses is therefore simply calculated by applying formula (A.3):

$$T_{\text{brushes}} = T_m - T_0 \quad (\text{A.3})$$

There is also a relationship between the torque T_{brushes} due to friction losses and the tangential force acting on the brush; it is given by formula (A.4):

$$F_t = \frac{2 \times T_{\text{brushes}}}{D} \quad (\text{A.4})$$

where

D is the diameter of the commutator.

Therefore the friction coefficient μ can be determined by applying formula (A.3) and (A.4) to formula (4) specified in its definition 3.1.14:

$$\mu = \frac{2 \times T_{\text{brushes}}}{D \times F_r} = \frac{2 \times (T_m - T_0)}{D \times F_r} \quad (\text{A.5})$$

NOTE When the brush-holder is in the radial position, the radial force acting on the brush F_r is normal and equal in value to the force applied by the pressure system F_p , which is calibrated. Therefore formula (A.5) becomes formula (A.6):

$$\mu = \frac{2 \times (T_m - T_0)}{D \times F_p} \quad (\text{A.6})$$

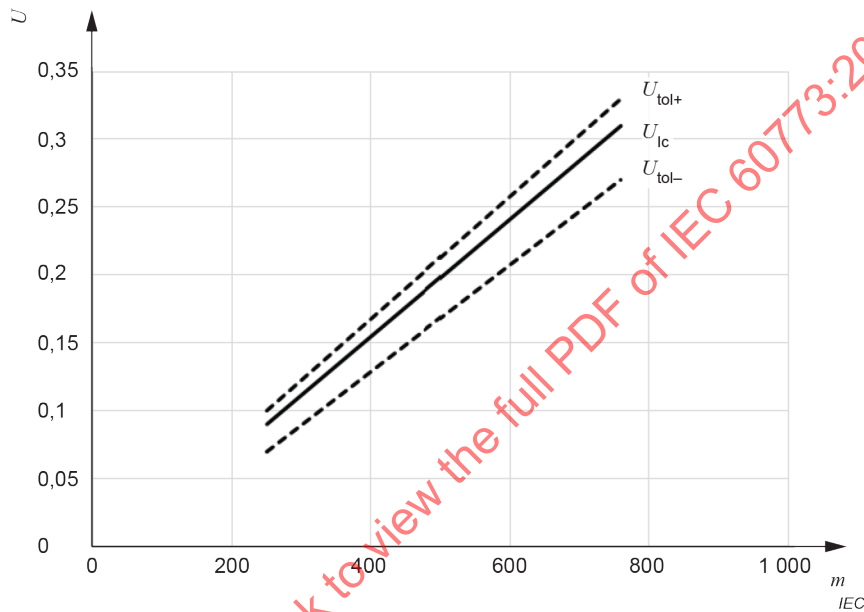
A.2 Adjustment of strain sensor for calculation of friction coefficient by using method b) of 4.1.6.1.3

A.2.1 General

Adjustment may be done by two steps:

A.2.2 Correlation between output voltage and load

A correlation of strain gauge output voltage within load may be done by adding different mass on the lever arm and then calculating the equation of output voltage U_{lc} as a function of mass m , as shown in Figure A.1.



Key

m	Mass, in g
U_{lc}	Output voltage of load cell, in V
U_{tol-}	Lower tolerance
U_{tol+}	Upper tolerance

Figure A.1 – Correlation of load cell output voltage U_{lc} with mass m

A.2.3 Correlation between friction coefficient and load

The measurement of F_t is not done at the point where the friction force applies. Therefore the force sensor measures a force $F_{t,lc}$ proportional to the real force F_t according to formula (A.7).

$$F_{t,lc} = F_t \times dr \quad (A.7)$$

where dr is the distance ratio, which is calculated from the lever arm length la and ring diameter D by formula (A.8):

$$dr = \frac{D}{2 \times la} \quad (A.8)$$

where:

D is the diameter of the ring;

la is the lever arm length (distance between the tare application point and the center of the ring).

The correlation between friction coefficient and mass is then made by applying limit conditions:

- a) When $\mu = 1$: F_t is equal to F_N , which corresponds to point A on Figure A.2. Therefore the real force $F_t(A)$ at this point A is given by applying formula (A.9):

$$F_t(A) = F_N = N_B \times t \times a \times p \quad (\text{A.9})$$

Curve a) passes by 0 and A.

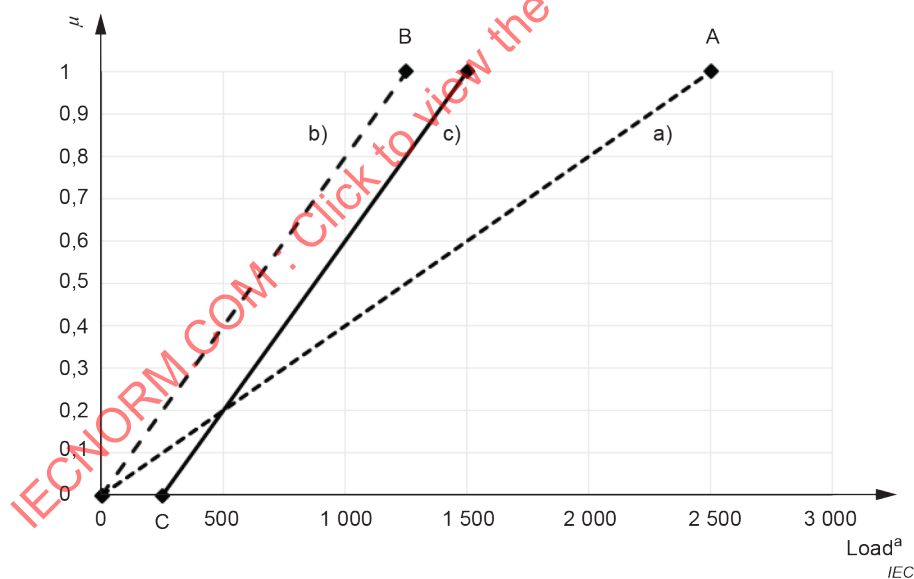
Then by applying formula (A.9) into formula (A.7) the force sensor measures a load corresponding to the normal force F_N corrected by the distance ratio dr :

$$F_{t,lc}(B) = N_B \times t \times a \times p \times dr \quad (\text{A.10})$$

Point B on Figure A.2 is obtained. Curve b) passes by 0 and B and represents a corrected curve for the load sensor.

- b) When $\mu = 0$: it means that no brushes are in contact. The force sensor measures a residual load corresponding essentially to the tare mass represented by point C of Figure A.2.

Finally curve c) of Figure A.2 is obtained, which passes by point C and has the same slope as the curve b).



Key

μ friction coefficient

a) Real curve

b) Corrected curve with lever arm

c) Corrected curve with tare mass

^a Load in gf (gram force)

Figure A.2 – Example of correlation between load and friction coefficient μ

Example: Figure A.2 is an example for the following parameters conditions:

Spring pressure p is $200 \text{ gf/cm}^2 = 19,6 \text{ kN/m}^2$;

N_B is 4 brushes;

Brush dimensions: l is 12,5 mm and a is 25 mm;

Distance ratio dr is 0,5 mm;

Tare mass m is 250 g.

When $\mu = 1$, the real force is $4 \times 200 \times 1,25 \times 2,5 = 2\,500 \text{ gf}$ (point A).

The corrected force is $2\,500 \times 0,5 = 1\,250 \text{ gf}$ (point B).

When $\mu = 0$, the residual force is equal to the tare mass, i.e. 250 gf (point C).

NOTE Another method consists in directly correlating the friction coefficient and the output voltage of the force sensor, but only for a given mass m .

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021

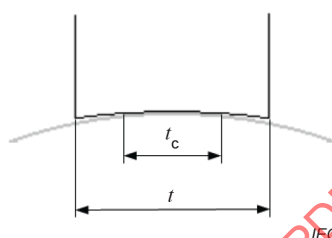
Annex B (informative)

Black-band zone deviation cases

B.1 Black-band zone in case of limited contact area

A limited contact area, which is observed as a shining zone surrounded by a mat zone (see item 706 of IEC 60276:2018), is generally due to an inadequate brush bedding or brush seating. In other words the actual contact area of the brush is not 100 % of the theoretical brush contact area. It means that the tangential dimension at contact is less than the theoretical tangential contact dimension of the brush (when the brush contact is total).

Figure B.1 illustrates the reduction of tangential dimension at contact for a radial brush.



Key

t tangential dimension of the brush

t_c contact tangential dimension

Figure B.1 – Limited contact area and reduction of tangential dimension at contact

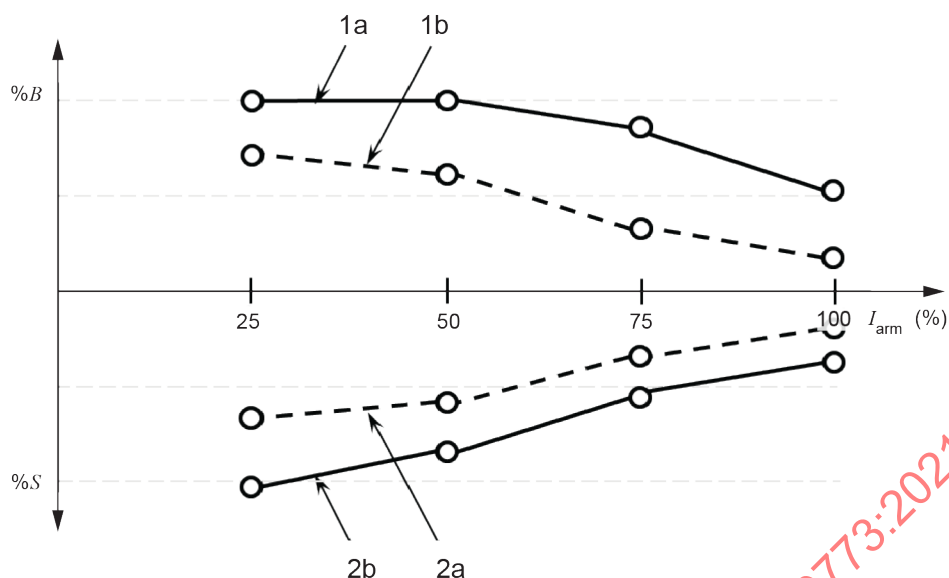
In this case the resulting commutation time is shorter, in other words, commutation current reversing time is shorter, and it causes a higher di/dt during commutation and a higher reactance voltage E_r .

Basically, the inter-pole magnetic strength, which is explained in terms of commutation voltage E_c , is accurately adjusted so that it may compensate the reactance voltage E_r , in order to promote the commutation current reversing, in condition with a total brush contact (contact surface is 100 %).

In the case of a limited contact area, the higher reactance voltage E_r is superior to the commutation voltage E_c . It causes only apparently inter-pole magnetic strength shortage, resulting in the black-band centre line inclined with right hand side upward.

In addition, the black-band width is decreased, because it is, theoretically, inversely proportional to the reactance voltage E_r .

Figure B.2. shows the black-band zone shift in case of limited contact area due to inadequate brush bedding or brush seating.



Key

- I_{arm} Armature current
- $\%B$ $\%Boost$
- $\%S$ $\%Subtract$
- 1 Curve for $\%Boost$
- 2 Curve for $\%Subtract$
- a Adequate brush bedding (normal)
- b Inadequate brush bedding

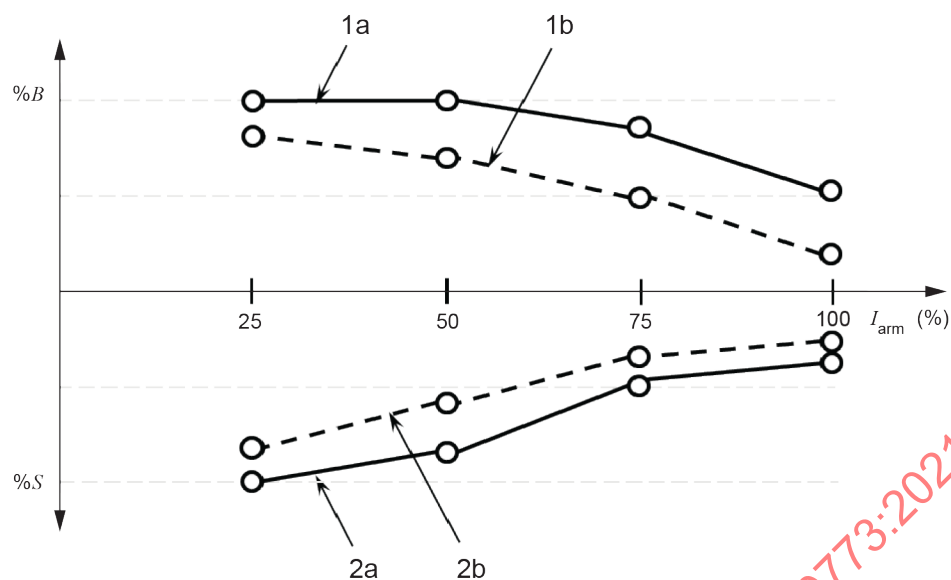
Figure B.2 – Black-band zone in case of a limited contact area

B.2 Influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone.

According to the manufacturer's factory test experiences, in case that brush mechanical instability is found, where brush chattering occurs, "over commutation side boundary" shifts downward heavily with load, while the "under commutation side boundary is kept unchanged, resulting in black-band width decrease with load increase, compared with normal condition.

In this case, the black-band zone centre is inclined with right hand side downward, therefore, the inter-pole magnetic field is only apparently strengthened.

Figure B.3. shows the influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone.



IEC

Key

- I_{arm} Armature current
 $\%B$ %Boost
 $\%S$ %Subtract
 1 Curve for %Boost
 2 Curve for %Subtract
 a Brush with normal behaviour
 b Brush with chattering behaviour

Figure B.3 – Influence of brush mechanical contact instability of brush chattering on the black-band zone

B.3 Black-band zone hysteresis between increased I_a and decreased I_a

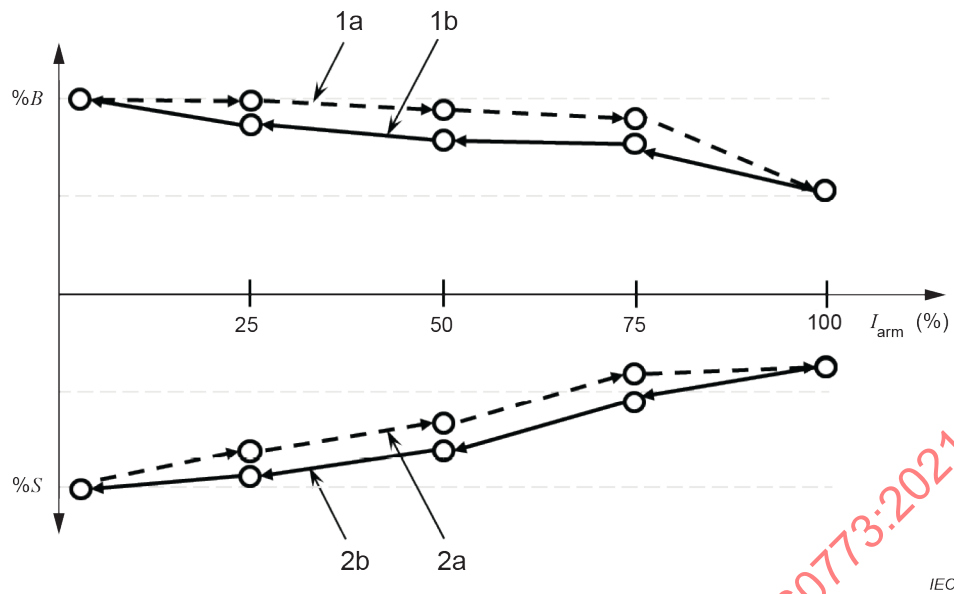
As described in Clause 9, the commutation voltage E_c compensates the reactance voltage E_r , resulting in successful commutation.

On the other hand, the commutation voltage E_c is proportional to the commutation flux density B_c , according to "Fleming's Right Hand Law".

The commutation flux density has hysteresis characteristics between increased I_{arm} and decreased I_{arm} , due to the iron core characteristics in the magnetic circuit.

Therefore, the black-band zone also has hysteresis characteristics, where the black-band curve for increasing armature current I_{arm} , rises above the curve for decreasing armature current I_{arm} .

Figure B.4 shows the black-band zone hysteresis between increasing I_{arm} and decreasing I_{arm} .



Key

- I_{arm} Armature current
- %B %Boost
- %S %Subtract
- 1 Curve for %Boost
- 2 Curve for %Subtract
- a Increasing I_{arm}
- b Decreasing I_{arm}

Figure B.4 – Black-band zone hysteresis between increasing I_{arm} and decreasing I_{arm}

Annex C (informative)

Test report example

Grade		Family (group of grades):	
-------	--	---------------------------	--

– Grade indicative composition (mass fraction %):

Graphite		Solid lubricant (optional, if applicable)	
Copper or silver (if applicable)		Other metal (optional, if applicable)	

– Average physical characteristics (according to IEC 60413):

Bulk density		Hardness by indentation (optional)	
Resistivity ($\mu\Omega\cdot\text{m}$ or $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)		Thermal conductivity (J/m/K) (optional)	
Flexural strength (MPa or daN/cm^2)		Other (optional)	

– Application recommendation (optional):

Classification of electrical machine:	☐ asynchronous	☐ synchronous	☐ DC
Ring material (when specific)		Pressure (kPa) (or specific pressure, kN/m^2)	
Current density range (A/cm^2)		Maximum peripheral speed (m/s)	

– Testing conditions (according to IEC 60773):

Classification of test ring:	☐ plain ring	☐ helical grooved ring	☐ axially slotted ring
Ring material (ISO) or characteristics		Other information (optional):	
Brushes dimensions (mm):	t	a	r
Brush holder:	length r_H (mm)	angle α (°)	angle β (°)
Current density (A/cm^2) ^a		Current type:	AC/ DC
Specific pressure ($\text{kPa} = \text{kN/m}^2$ or gf/cm^2)		Maximum peripheral speed (m/s) ^a	
Test type:	☐ friction coefficient	☐ voltage drop	☐ wear

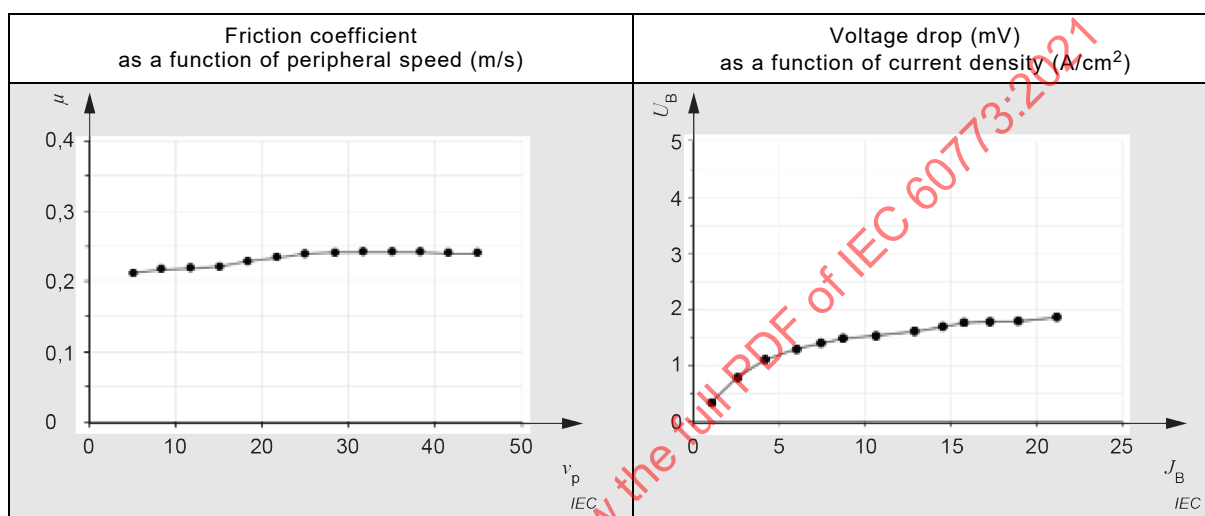
^a for bedding and wear test.

– Test results (according to IEC 60773):

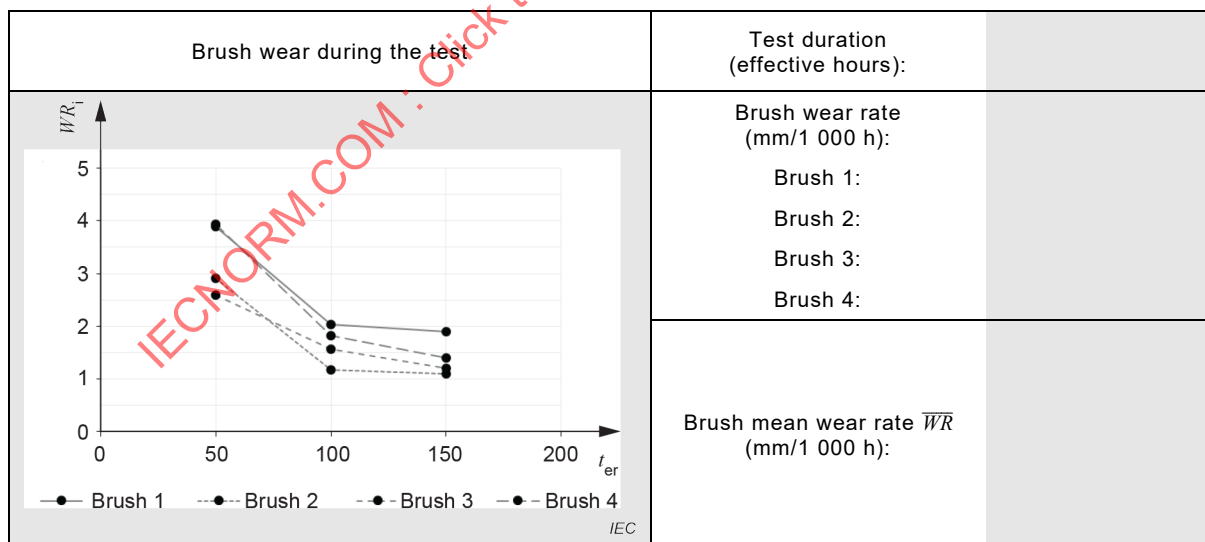
- Temperatures and humidity (average):

Ambient air temperature (°C):		Absolute humidity (g/m ³):	
Brush temperature (°C) $\theta(\text{TC1})=$ $\theta(\text{TC2})=$ $\theta(\text{TC3})=$		Ring temperature (°C)	

- Friction coefficient and voltage drop:



- Wear (if applicable):



NOTE 1 Words in *italics* are tips to fill in this report.

NOTE 2 In grey are the cells to be completed.

NOTE 3 Graphs are for example (see respectively Figure 18, Figure 19 and Figure 21).

Bibliography

IEC 60027-4:2006, *Letter symbols to be used in electrical technology – Part 4: Rotating electric machines*

IEC 60034-1:2017, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60050-103:2009, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 103: Mathematics – Functions*

IEC 60050-811:2017, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 811: Electric traction*

IEC 60413, *Test procedures for determining physical properties of brush materials for electrical machines*

ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*

ISO 4287:1997/AMD1:2009, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters – Amendment 1: Peak count number*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	82
1 Domaine d'application	84
2 Références normatives	84
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés	84
3.1 Termes et définitions	85
3.2 Symboles	91
3.2.1 Symboles et unités	91
3.2.2 Indices	93
3.3 Termes abrégés	94
4 Spécification du banc d'essai	94
4.1 Spécification commune	94
4.1.1 Généralités	94
4.1.2 Bagues	94
4.1.3 Balais	95
4.1.4 Porte-balais	96
4.1.5 Alimentation électrique	97
4.1.6 Instrumentation	98
4.2 Spécification du banc d'essai pour les collecteurs	108
4.2.1 Généralités	108
4.2.2 Bagues d'essai	109
4.2.3 Disposition des balais	112
4.2.4 Balai spécial pour le mesurage de la chute de tension	113
4.3 Spécification du banc d'essai pour les bagues	114
4.3.1 Généralités	114
4.3.2 Bague	114
4.3.3 Balais	116
4.3.4 Configuration pour un fonctionnement en courant continu et en courant alternatif	116
5 Procédure d'essai et conditions de fonctionnement	118
5.1 Généralités	118
5.2 Conditions d'environnement	119
5.2.1 Environnement du laboratoire	119
5.2.2 Température de l'air ambiant et température de surface de la bague	119
5.2.3 Humidité ambiante	119
5.3 Conditions de fonctionnement	119
5.4 Préparation de l'essai et inspection	120
5.4.1 Généralités	120
5.4.2 Banc d'essai	120
5.4.3 Porte-balais	120
5.4.4 Balais d'essai	120
5.4.5 Rugosité de la bague	121
5.4.6 Rodage des balais	121
5.4.7 Mesurage des balais	121
5.5 Séquence d'essai	121
5.5.1 Début de l'essai	121
5.5.2 Durée de l'essai	121
5.6 Mesurages et observations	122

5.6.1	Généralités	122
5.6.2	Intervalle entre les mesurages	122
5.6.3	Avant de commencer une séquence d'essai	122
5.6.4	Mesurages pendant une séquence d'essai	123
5.6.5	Mesurages après une séquence d'essai	123
6	Détermination du coefficient de frottement	124
6.1	Généralités	124
6.2	Conditions d'essai	124
6.3	Mesurages	124
6.3.1	Généralités	124
6.3.2	Configuration du banc d'essai pour la Méthode a)	125
6.3.3	Configuration du banc d'essai pour la Méthode b)	125
6.4	Calcul du coefficient de frottement	125
6.4.1	Configuration du banc d'essai pour la Méthode a)	125
6.4.2	Configuration du banc d'essai pour la Méthode b)	125
6.5	Rapport	126
7	Détermination de la chute de tension	126
7.1	Généralités	126
7.2	Conditions d'essai	127
7.3	Mesurages	127
7.3.1	Généralités	127
7.3.2	Chute de tension totale du balai U_B	127
7.3.3	Chute de tension au contact du balai U_C	128
7.4	Calcul	128
7.4.1	Chute de tension totale du balai U_B	128
7.4.2	Chute de tension au contact du balai U_C	128
7.5	Rapport	130
8	Détermination de l'usure des balais	130
8.1	Généralités	130
8.2	Conditions d'essai	131
8.3	Mesurages	131
8.4	Calcul de l'usure des balais	131
8.5	Rapport	133
9	Détermination de la capacité de commutation des nuances de balai par un essai spécifique de bande noire sur une machine à courant continu	133
9.1	Généralités	133
9.2	Montage	133
9.3	Procédure d'essai	136
9.3.1	Préparation de l'essai	136
9.3.2	Conditions de fonctionnement et séquence d'essai	136
9.4	Représentation graphique de la bande noire	137
9.5	Interprétation	139
9.5.1	Généralités	139
9.5.2	Influence de l'épaisseur de la patine (épaisse/mince) du collecteur sur la zone de bande noire	139
9.5.3	Influence de la résistance de contact des balais	140

9.5.4	Estimation de l'écart de stabilité du contact mécanique par comparaison des représentations graphiques de la bande noire avant et après une longue période de fonctionnement critique.....	142
Annexe A (informative) Informations supplémentaires concernant le mesurage du coefficient de frottement		145
A.1	Détails du calcul du coefficient de frottement par la méthode a) de 4.1.6.1.2	145
A.2	Ajustement du capteur de force pour le calcul du coefficient de frottement par la méthode b) de 4.1.6.1.3	146
A.2.1	Généralités	146
A.2.2	Corrélation entre la tension de sortie et la charge:.....	146
A.2.3	Corrélation entre le coefficient de frottement et la charge:	146
Annexe B (informative) Cas de déviation de la zone de bande noire		149
B.1	Zone de bande noire en cas de surface de contact limitée	149
B.2	Influence de l'instabilité du contact mécanique des balais, due au broutage des balais sur la zone de bande noire	150
B.3	Hystérésis de la zone de bande noire entre I_a croissant et I_a décroissant	151
Annexe C (informative) Exemple de rapport d'essai		153
Bibliographie.....		155
Figure 1 – Profil et détermination de la hauteur des éléments du profil		85
Figure 2 – Forces agissant sur un balai		88
Figure 3 – Chutes de tension dans un balai en service		89
Figure 4 – Configuration de porte-balais		97
Figure 5 – Mesurage du couple mécanique par la méthode a).....		99
Figure 6 – Machine pour essais de balais selon la méthode b).....		100
Figure 7 – Configuration de banc d'essai avec un capteur dynamométrique.....		101
Figure 8 – Point d'application de l'électrode de contact du balai pour U_c		104
Figure 9 – Position d'insertion des thermocouples		105
Figure 10 – Évaluation de la température de contact θ_c par interpolation.....		106
Figure 11 – Représentation des dimensions et de la préparation des rainures de lames		110
Figure 12 – Recouvrement du balai		112
Figure 13 – Configuration des balais.....		113
Figure 14 – Disposition du balai de contrôle.....		114
Figure 15 – Caractéristiques des rainures		115
Figure 16 – Configuration du banc d'essai pour un fonctionnement en courant continu avec 2 balais par polarité		117
Figure 17 – Configuration du banc d'essai pour un fonctionnement en courant alternatif avec 2 balais		118
Figure 18 – Exemple de représentation graphique du coefficient de frottement μ en fonction de la vitesse périphérique v_p		126
Figure 19 – Exemple de représentation graphique de la chute de tension totale du balai U_B en fonction de la densité de courant J_B		130
Figure 20 – Exemple de taux d'usure WR_i des balais pendant l'essai pour un banc d'essai avec 4 balais.....		132
Figure 21 – Configuration du circuit d'essai de bande noire avec une génératrice à courant continu et une charge résistive.....		134

Figure 22 – Configuration du circuit d'essai de bande noire pour la méthode de charge en retour de Brondell	135
Figure 23 – Détermination de la zone de bande noire pour une vitesse de rotation constante spécifiée	138
Figure 24 – Influence de l'épaisseur de la patine du collecteur sur la zone de bande noire	140
Figure 25 – Comparaison des bandes noires pour un balai avec une résistance de contact élevée et un balai avec une faible résistance de contact dans le cas d'un moteur	141
Figure 26 – Comparaison des bandes noires pour un balai avec une résistance de contact élevée et un balai avec une faible résistance de contact dans le cas d'une génératrice	142
Figure 27 – Déviation de la représentation graphique de la bande noire avant et après un fonctionnement critique sous une charge maximale redondante de 225 %, pour une nuance "efficace"	143
Figure 28 – Déviation de la représentation graphique de la bande noire avant et après un fonctionnement critique sous une charge maximale redondante de 225 %, pour une nuance "faible"	144
Figure A.1 – Corrélation entre la tension de sortie du capteur dynamométrique U_{IC} et la masse m	146
Figure A.2 – Exemple de corrélation entre la charge et le coefficient de frottement μ	147
Figure B.1 – Surface de contact limitée et réduction de la dimension tangentielle au contact	149
Figure B.2 – Zone de bande noire en cas de surface de contact limitée	150
Figure B.3 – Influence de l'instabilité du contact mécanique des balais, due au broutage des balais sur la zone de bande noire	151
Figure B.4 – Hystérésis de la zone de bande noire entre I_{arm} croissant et I_{arm} décroissant	152
Tableau 1 – Dimensions des balais d'essai	96
Tableau 2 – Conditions d'essai	120

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES – MÉTHODES D'ESSAI ET APPAREILS POUR LE MESURAGE DES CARACTÉRISTIQUES OPÉRATIONNELLES DES BALAIS

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60773 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1983. Elle constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- La structure des articles a été modifiée du point de vue d'une procédure d'essai en laboratoire. La nouvelle séquence est la suivante: spécification du banc d'essai (Article 4), procédure générale d'essai (Article 5), et procédure spécifique relative à chaque caractéristique opérationnelle (Articles 6 à 8).
- Un nouvel Article 9 a été ajouté pour présenter l'essai de bande noire pour la caractérisation des nuances de balais pour machines à courant continu.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/2045/FDIS	2/2050/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette Norme internationale.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES – MÉTHODES D'ESSAI ET APPAREILS POUR LE MESURAGE DES CARACTÉRISTIQUES OPÉRATIONNELLES DES BALAIS

1 Domaine d'application

Le présent document s'applique aux méthodes d'essai pour le mesurage des caractéristiques opérationnelles des balais conçus pour fonctionner sur des machines avec commutation et sur des machines à bagues, dans des conditions d'essai spécifiées.

Par extension, certains essais peuvent être pertinents pour d'autres types de contacts électriques glissants pour appareils électriques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60034-19:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 19: Méthodes spécifiques d'essai pour machines à courant continu à alimentation conventionnelle ou redressée*

IEC 60136, *Dimensions des balais et porte-balais pour machines électriques*

IEC 60276:2018, *Balais de charbon, porte-balais, collecteurs et bagues – Définitions et nomenclature*

IEC 60356, *Dimensions des collecteurs et des bagues*

IEC 60584-1:2013, *Couples thermoélectriques – Partie 1: Spécifications et tolérances en matière de FEM*

IEC 60751:2008, *Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine*

IEC/TR 61015, *Porte-balais de machines électriques – Guide pour la mesure de la poussée statique appliquée aux balais*

ISO 1190-1:1982, *Cuivre et alliages de cuivre – Code de désignation – Partie 1: Désignation des matériaux*

ISO 3274:1996, *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface: Méthode du profil – Caractéristiques nominales des appareils à contact (palpeur)*

ISO 15510:2014, *Stainless steels – Chemical composition* (disponible en anglais seulement)

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1 Termes et définitions

3.1.1

faux-rond

imprécision du système tournant, mesurée à la surface de la bague en cours de rotation

Note 1 à l'article: Cela inclut l'ovalisation (c'est-à-dire ne présentant pas d'écart de circularité); l'excentricité (c'est-à-dire ne présentant pas d'écart de concentricité) ou la flexion axiale (que les surfaces soient ou non parfaitement rondes et concentriques en chaque point de la section).

3.1.2

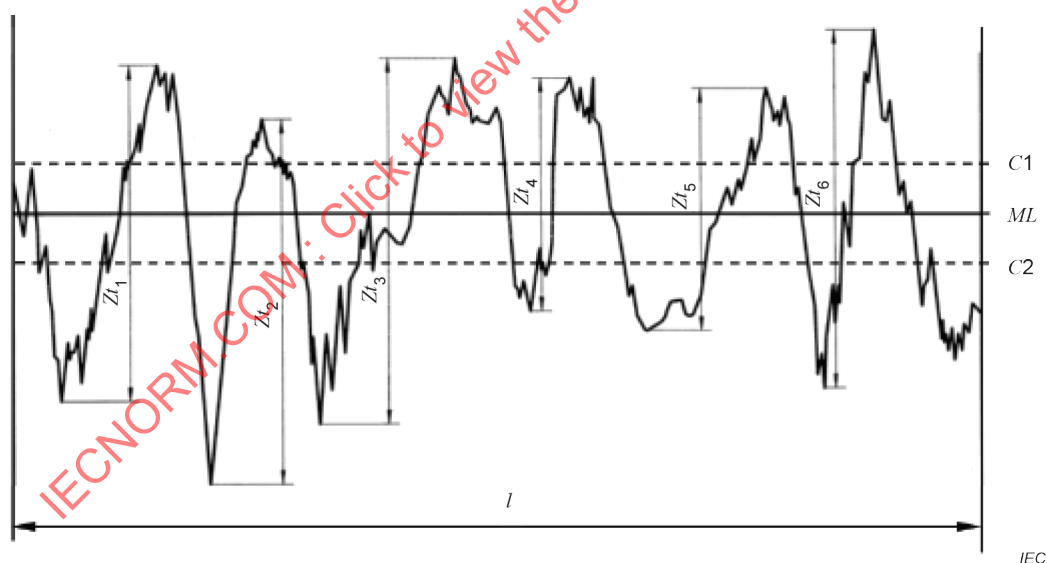
rugosité

R_a

moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ d'un profil à l'intérieur d'une longueur de base l

$$R_a = \frac{1}{l} \times \int_0^l |Z(x)| \cdot dx$$

Exemple: La Figure 1 représente un exemple de profil.



Légende

Z_{t_i}	hauteur de l'élément de profil i
l	longueur de base
ML	ligne moyenne
$C1$ et $C2$	lignes d'intersection supérieure et inférieure (respectivement)

Figure 1 – Profil et détermination de la hauteur des éléments du profil

[SOURCE: ISO 4287:1997, Figure 9]

3.1.3

nombre de pics

RP_c

nombre d'éléments de profil par centimètre de longueur de base qui dépassent la ligne d'intersection supérieure *CI* et n'atteignent pas la ligne d'intersection inférieure *C2*

Note 1 à l'article: Les deux lignes d'intersection sont parallèles à la ligne moyenne du diagramme (voir la Figure 1).

[SOURCE: ISO 4287/A1:2009, 4.3.2]

3.1.4

pierre abrasive

matériau utilisé pour usiner une surface

Note 1 à l'article: La qualité du matériau et la méthode d'application dépendent de son utilisation. Par conséquent, pour les besoins du présent document, les définitions 3.1.5, 3.1.7 et 3.1.8 sont utilisées.

3.1.5

pierre à rectifier

pierre abrasive utilisée pour rectifier la bague d'essai

Note 1 à l'article: Elle est généralement constituée de grains durs abrasifs.

3.1.6

prérodage de balai

opération au terme de laquelle la surface de contact d'un balai est ajustée au profil de la bague

3.1.7

pierre à ajuster

pierre abrasive utilisée pour ajuster/péroder le balai au collecteur/à la bague

3.1.8

pierre à rugosité

pierre abrasive utilisée pour obtenir la plage de rugosité appropriée pour la bague d'essai, généralement constituée de grains abrasifs tendres

3.1.9

surface de contact du balai

S

surface du balai en contact avec la surface de la bague

Note 1 à l'article: Lorsqu'un balai radial est utilisé, la surface de contact du balai *S_r* est la section droite du balai:

$$S = t \times a \quad (1)$$

où *t* et *a* sont respectivement les dimensions tangentielle et axiale du balai.

Lorsqu'un balai incliné est utilisé, l'angle inférieur fait partie de la formule qui donne la surface de contact du balai *S_α*:

$$S_{\alpha} = \frac{t \times a}{\cos \alpha} \quad (2)$$

où *α* est l'angle d'inclinaison (ou angle inférieur).

3.1.10**pression spécifique du balai** p

force par surface de contact du balai, donnée par la formule (3):

$$p = \frac{F_p}{S} \quad (3)$$

où F_p est la force appliquée par le système de pression;

et S est la surface de contact du balai

Note 1 à l'article: Lorsque F_p est exprimée en grammes-force (gf) et la surface de contact du balai en cm^2 , la pression spécifique calculée est exprimée en gf/cm^2 . Pour convertir en unités SI: le résultat en gf/cm^2 multiplié par 98,07 donne p en N/m^2 (98,07 est l'accélération due à la pesanteur en m/s^2 multipliée par 10)

3.1.11**facteur d'ondulation du courant** q_i

rapport de la différence entre la valeur maximale $I_{\max}$ et la valeur minimale $I_{\min}$ d'un courant ondulé au double de sa valeur moyenne $\bar{I}$ (valeur moyenne intégrée sur une période):

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \times \bar{I}}$$

Note 1 à l'article: Pour de faibles valeurs d'ondulation du courant, le facteur d'ondulation peut être approché par la formule suivante:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Note 2 à l'article: La formule ci-dessus peut être utilisée en tant qu'approximation lorsque la valeur calculée résultante de q_i est inférieure ou égale à 0,4.

[SOURCE: IEC 60034-1:2017, 3.29]

3.1.12**état stable**

état d'un système physique dans lequel les caractéristiques pertinentes sont considérées comme étant pratiquement constantes dans le temps

[SOURCE: IEC 60050-103:2009, 103-05-01]

3.1.13**pratiquement constant**

un résultat de mesure est considéré comme étant pratiquement constant lorsque l'écart par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 2,5 % (sauf spécification contraire)

Note 1 à l'article: L'état de stabilité peut être déterminé à partir d'un tracé de l'augmentation de la mesure en fonction du temps, lorsque les droites entre points pris en début et fin de chacun de deux intervalles de temps successifs d'une demi-heure chacun présentent un écart inférieur au critère de 2,5 %.

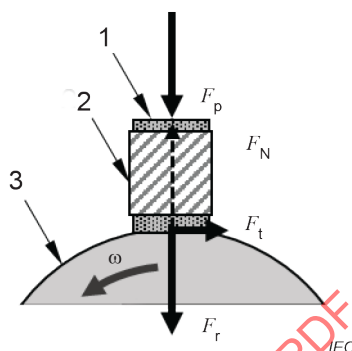
3.1.14 coefficient de frottement

μ

rapport de la force tangentielle qui agit à l'interface F_t à la force radiale qui agit à l'interface F_r

$$\mu = \frac{F_t}{F_r} \quad (4)$$

Note 1 à l'article: La Figure 2 représente les forces qui agissent sur le balai lorsqu'un porte-balais radial est appliqué. La valeur numérique de la force radiale F_r est égale à la valeur numérique de la force de réaction normale F_N (de la surface de contact du balai sur la bague) et à la valeur numérique de la force du système de pression F_p sur la tête du balai.



Légende

- 1 Balai
- 2 Porte-balais
- 3 Bague d'essai
- ω Vitesse angulaire (avec indication du sens de rotation)

Figure 2 – Forces agissant sur un balai

3.1.15 chute de tension du balai

U_B

chute de tension totale entre la cosse du balai et la bague ou le collecteur

Note 1 à l'article: U_B est un paramètre complexe qui correspond à la somme des chutes de tension U_s , U_f , U_i et U_c , comme cela est représenté à la Figure 2 (qui concerne un balai avec une connexion flexible scellée).

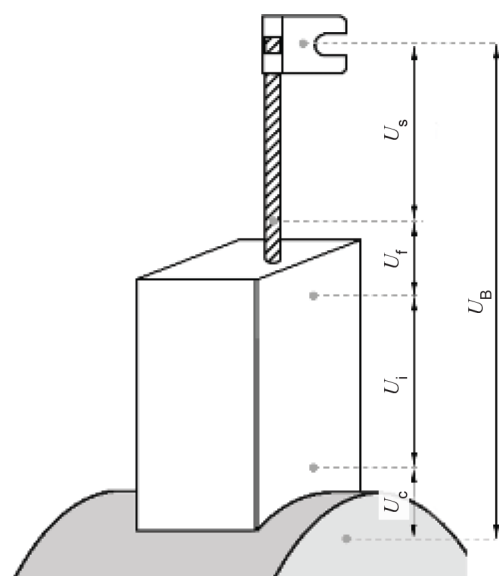


Figure 3 – Chutes de tension dans un balai en service

3.1.16

chute de tension dans le shunt

U_s

chute de tension dans le shunt (flexible) et sa connexion à la cosse du balai

3.1.17

chute de tension dans la connexion

U_f

chute de tension entre le shunt (flexible) et la nuance de balai

Note 1 à l'article: Le mesurage de la chute de tension dans la connexion U_f est décrit dans l'IEC 60136.

3.1.18

chute de tension interne du balai

U_i

chute de tension interne du balai (due à la résistance de la nuance de balai)

3.1.19

chute de tension au contact

U_c

chute de tension au contact entre la nuance de balai et la bague

Note 1 à l'article: La chute de tension au contact U_c est une caractéristique de fonctionnement d'un balai. Voir l'Article 7.

3.1.20

pas de rainure

τ_Q

distance entre deux rainures consécutives de la bague, définie par le quotient du périmètre de la bague $\pi \times D$ par le nombre de rainures Q

$$\tau_Q = \frac{\pi \times D}{Q} \quad (5)$$

où D est le diamètre de la bague

[SOURCE: IEC 60027-4:2006, 612]

3.1.21

taux de recouvrement

τ_B

nombre de segments recouverts par le balai suivant la dimension t , calculé à l'aide de la formule (6)

$$\tau_B = \frac{t}{\tau_Q} \quad (6)$$

3.1.22

vitesse périphérique

v_p

vitesse tangentielle, en un point de la surface périphérique, d'un corps en rotation, exprimée en distance par unité de temps

Elle est calculée à l'aide de la formule (7)

$$v_p = \frac{n \times \pi \times D}{60} \quad (7)$$

où

D est le diamètre de la bague, en mètres et n est la vitesse de rotation, en nombre de tours par minute (r/min).

[SOURCE: IEC 60050-811:2017, 811-13-29, modifiée – ajout de la formule]

3.1.23

densité de courant

J_B

grandeur relative à un balai et égale au quotient du courant I par la section droite $t \times a$ du balai, selon la formule (8):

$$J_B = \frac{I}{t \times a} \quad (8)$$

Note 1 à l'article: J_B est habituellement exprimée en A/cm² lorsque I est exprimé en A et t , a en cm.

3.1.24

température de l'air ambiant

température moyenne de l'air qui entoure les échantillons de balais

3.1.25

température de surface de la bague

température moyenne à la surface de la bague soumise à l'essai

3.1.26

rodage du balai

opération au terme de laquelle la surface de contact du balai est complètement rodée et une patine s'est formée sur la surface de la bague

3.1.27

patine

film sur le collecteur ou la bague, principalement constitué du matériau du balai, du métal du collecteur/de la bague (et de ses oxydes) et d'eau

[SOURCE: IEC 60276:2018, 601]

3.1.28

usure du balai

Δr_i

usure linéaire d'un balai i au cours de l'essai

Pour chaque balai i , l'usure du balai est calculée à l'aide de la formule (9):

$$\Delta r_i = r_{0i} - r_i \quad (9)$$

où:

r_{0i} est la dimension r de chaque balai i (longueur du balai) avant l'essai;

r_i est la dimension r de chaque balai i (longueur du balai) après l'essai.

3.1.29

taux d'usure du balai

WR_i

usure linéaire du balai i au cours d'une période, qui est calculée à l'aide de la formule (10):

$$WR_i = \frac{\Delta r_i}{t_{er}} \quad (10)$$

où t_{er} est la durée de fonctionnement effectif

Note 1 à l'article: En général, il est exprimé en mm/1 000 h (mm d'usure du balai/1 000 h de fonctionnement effectif) lorsque l'usure du balai est exprimée en mm et le résultat de la formule ci-dessus est multiplié par 1 000. Voir 8.4.

3.1.30

zone de bande noire

zone BB

intervalle défini par les limites de commutation minimale et maximale sans étincelles (entre lesquelles la commutation s'effectue sans étincelles); les limites de commutation sans étincelles étant obtenues par renforcement ou réduction du courant d'excitation dans les pôles de commutation pour des courants de charge allant jusqu'au courant assigné au moins

Note 1 à l'article: Elle correspond à la zone sans étincelles. Cet essai est parfois appelé "*back boost test*".

Note 2 à l'article: Le terme abrégé BB est dérivé du terme anglais développé correspondant "*black band*".

[SOURCE: IEC 60034-19:2014, 3.1.4 – modifiée: ajout de la définition des limites]

3.2 Symboles

3.2.1 Symboles et unités

a	dimension axiale du balai (mm)
b	largeur d'encoche ou de rainure (mm)
CI	ligne d'intersection supérieure (dans un profil de rugosité)
$C2$	ligne d'intersection inférieure (dans un profil de rugosité)
D	diamètre de la bague d'essai (m)
dr	rapport de distance
d_B	distance dans le sens radial du balai entre la surface de contact du balai et la tête du balai (mm)

f	fréquence (Hz)
F	force appliquée (N ou gf)
h	pas de rainure hélicoïdale (mm)
HA	humidité absolue (g/m ³ d'air)
HR	humidité relative
I	courant (A)
J_B	densité de courant dans un balai (A/cm ² ou A/m ²)
k_R	nombre de rainures sous le balai dans le sens tangentiel
l	longueur ou distance (m)
la	longueur de bras de levier (m)
l_{er}	distance parcourue par la piste sous le balai pendant la durée de fonctionnement effectif
q_i	facteur d'ondulation
m	masse (g)
n	vitesse de rotation (tours par minute, r/min)
N_B	nombre de balais par machine
p	pression spécifique appliquée sur le balai (kN/m ²)
P	puissance (W)
P_{in}	puissance fournie quand les balais sont en contact avec le collecteur ou la bague (W)
P_{el}	perte de puissance due aux pertes électriques (W)
P_f	perte de puissance due au frottement (W)
P_0	puissance fournie quand les balais ne sont pas en contact avec (ne glissent pas sur) le collecteur ou la bague (W)
r	dimension radiale du balai (mm)
r_i	dimension du balai numéro i après l'essai (mm)
r_{0i}	dimension du balai numéro i avant l'essai (mm)
R	résistance (Ω)
Ra	rugosité, valeur arithmétique (μ m)
RPc	nombre de pics (par cm)
r_B	rayon du balai (mm)
S	surface de contact du balai (cm ²)
t	dimension tangentielle du balai (mm)
t_{er}	durée de fonctionnement effectif (h)
T	couple (N.m)
U	tension (V)
$\overline{WR}$	taux d'usure moyen du balai (mm/1 000 h)
WR	taux d'usure du balai (mm/1 000 h)
Δr_i	usure du balai numéro i (mm)
$\overline{\Delta r}$	usure moyenne du balai (mm)
μ	coefficient de frottement
u_p	vitesse ou vitesse périphérique (m/s)

ρ	résistivité de la nuance de balai ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
τ_Q	pas de rainure (mm)
τ_B	taux de recouvrement (nombre de segments recouverts par le balai)
α	angle inférieur (rad)
θ	température (K)
ω	vitesse angulaire ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

NOTE $\bar{}$ désigne une valeur moyenne arithmétique

3.2.2 Indices

0	condition initiale
arm	induit
B	balai
c	contact
cp	pôle de commutation
er	fonctionnement effectif (durée)
f	connexion flexible (shunt)
H	porte-balais
i	interne (nuance de balai)
in	entrée (puissance)
lc	capteur dynamométrique
lin	linéaire
min	valeur minimale
max	valeur maximale
N	normale (sens)
p	système de pression
t	tangentiel
r	radial
R	bague
s	flexible (shunt)
T	tare
tol-	tolérance inférieure
tol+	tolérance supérieure
vol	volumétrique
α	angle inférieur
+	polarité positive (lorsqu'un courant continu est utilisé)
-	polarité négative (lorsqu'un courant continu est utilisé)
~	tension alternative (lorsqu'un courant alternatif est utilisé)

3.3 Termes abrégés

A	Ampèremètre
B	Ajusteur de courant
BB	Bande noire
BG	Nuance aggloméré avec une résine- ¹
CG	Nuance carbographitique- ¹
G	Génératrice à courant continu
HC	Nuance carbone (dur)- ¹
M	Moteur à courant continu
MG	Nuance métallographitique- ¹
MT	Moteur de démarrage
NG	Nuance graphite naturel- ¹
TC	Thermocouple
V	Voltmètre

4 Spécification du banc d'essai

4.1 Spécification commune

4.1.1 Généralités

Il est possible qu'un banc d'essai unique ne puisse être adapté à tous les paramètres d'application exigés; il s'ensuit donc que plusieurs types de bancs d'essai sont exigés. Ces bancs d'essai doivent être construits de telle manière que les paramètres exigés de fonctionnement des balais relatifs aux grandeurs à mesurer (voir les Articles 6 à 8) puissent être obtenus aisément et avec précision.

Il convient de tenir compte du fait que les valeurs absolues obtenues avec de telles machines d'essai diffèrent de celles qui sont obtenues sur des machines "réelles" en raison des nombreuses variables impliquées et du fait que ces équipements d'essai sont "sans commutation". De plus, pour les raisons énoncées ci-dessus et en raison de conditions ambiantes différentes, des résultats identiques peuvent ne pas être obtenus à l'aide de bancs d'essai de conception et de construction similaires.

Les dispositions du 4.1 spécifient les exigences générales pour le banc d'essai. Des exigences supplémentaires sont spécifiées en 4.2 pour les applications avec collecteurs et en 4.3 pour les bagues.

4.1.2 Bagues

4.1.2.1 Généralités

Pour les raisons énoncées ci-dessus, il n'est pas possible de fournir des spécifications pour une machine d'essai "normalisée" unique, mais il convient que les machines construites d'après les spécifications ci-après puissent produire des résultats satisfaisants.

¹ Définitions dans l'IEC 60276:2018.

4.1.2.2 Matériau des bagues

Il convient que le matériau des bagues d'essai et ses propriétés, notamment la dureté, soient conformes à l'application. La composition et la dureté conformément à une norme ISO doivent être spécifiées dans le rapport d'essai.

4.1.2.3 Dimensions et géométrie des bagues

Le diamètre de la bague d'essai ne doit pas être inférieur à 200 mm.

Le profil géométrique de la bague doit être mesuré à l'aide d'une jauge de profondeur appropriée lorsque la bague montée sur son axe tourne lentement dans ses propres paliers. Le faux-rond ne doit pas donner lieu à une déviation de la jauge de profondeur supérieure à 0,010 mm avec une seule ondulation. En outre, aucune vibration notable ne doit se produire à la vitesse de fonctionnement en raison d'un déséquilibre. Les essais doivent être effectués à une vitesse inférieure à la vitesse critique. Le faux-rond doit être consigné dans le rapport d'essai.

Cette précision doit être obtenue lorsque la bague est tournée avec un outil approprié à une vitesse aussi proche que possible de la vitesse d'essai la plus élevée, la bague étant montée dans ses propres paliers. Avant l'essai, les arêtes des encoches/rainures doivent être totalement ébavurées et tous les copeaux doivent être enlevés des encoches/rainures. Durant cette opération de tournage, une quantité minimale de métal doit être enlevée afin d'éviter la formation de bavures sur les arêtes.

La cylindricité peut être évaluée à partir du mesurage du profil au niveau de deux pistes différentes de la bague. Une valeur maximale de 0,010 mm est recommandée.

4.1.2.4 Rugosité

La rugosité est un indice de l'irrégularité de surface du collecteur ou de la bague.

Le rugosimètre doit être conforme à l'ISO 3274.

Le mesurage de la rugosité R_a et du nombre de pics RP_c doit être effectué dans les sens tangentiel et axial, à moins que le capteur tangentiel ne puisse pas être appliqué en raison d'une faible largeur de la lame de collecteur.

Le degré de rugosité R_a doit se situer entre 0,8 μm et 1,2 μm .

Pour l'évaluation de RP_c , il est recommandé de définir la ligne d'intersection supérieure et la ligne d'intersection inférieure respectivement à une distance de +1 μm et de -1 μm de la ligne moyenne d'intersection du diagramme.

Le nombre de pics RP_c doit être supérieur à 100 pics par centimètre.

La rugosité appropriée peut être facilement obtenue par une légère application d'une pierre à grains moyens appropriée sur la surface de la bague (voir 5.4.5).

4.1.3 Balais

Au moins deux balais par piste doivent être utilisés. Lorsqu'un plus grand nombre de balais par piste est utilisé, ils doivent être uniformément répartis autour de la bague.

Le Tableau 1 précise les dimensions des balais d'essai, avec indication des dimensions préférentielles en caractères gras.

Tableau 1 – Dimensions des balais d'essai

Dimensions en millimètres

Dimension	Nuance de balai				
	EG	BG	CG-HC	NG	MG
t	12,5 – 16 – 20	10 – 12,5	10 – 12,5 – 16	25 – 32	12,5 – 20 – 32
a	25 – 32	25	25	20 – 25	20 – 25
r	40 à 50	40 à 50	40 à 50	50	50

Il est souhaitable d'utiliser sur les moteurs asynchrones et synchrones à bagues des balais dont la dimension t est plus grande que la dimension a . Pour préserver la normalisation de l'appareillage d'essai, les mêmes porte-balais que ceux recommandés pour les "collecteurs" peuvent être utilisés. Les porte-balais qui ont la plus grande dimension t doivent de préférence être utilisés.

La fabrication des balais doit être conforme à l'IEC 60136.

Les balais peuvent, de préférence, être réalisés avec un biseau de contact compris entre 7,5° et 8° (position traînante – voir la Figure 4.c) pour assurer la stabilité mécanique, comme cela est expliqué en 4.1.4.

4.1.4 Porte-balais

Les porte-balais doivent être de construction robuste, fermement fixés à la machine pour qu'ils soient exempts de vibrations dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables et d'une conception telle qu'ils n'influencent pas la stabilité du contact entre le balai d'essai et la bague d'essai. La distance entre le porte-balais et le collecteur doit être comprise entre 2 mm et 3 mm. Le bas de la gaine du porte-balais doit être parallèle à la bague d'essai.

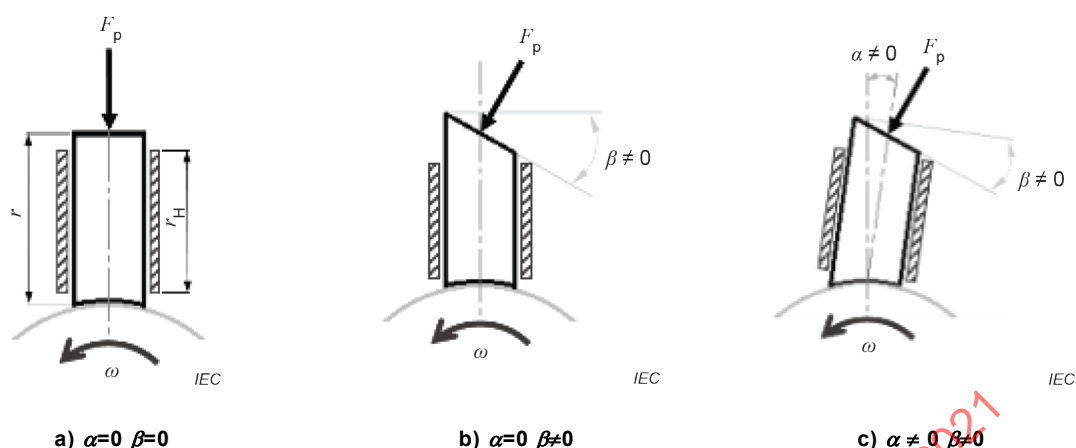
Les dimensions a et t du porte-balais doivent être adaptées aux dimensions des balais, telles qu'indiquées dans le Tableau 1, par rapport aux jeux spécifiés dans l'IEC 60136.

La dimension radiale du porte-balais r_H ne doit pas être inférieure aux $\frac{3}{4}$ de la dimension radiale r d'un balai neuf.

Le porte-balais doit être tel que la force s'applique suivant la dimension radiale r d'un balai (comme cela est représenté à la Figure 4) afin d'obtenir une bonne stabilité du balai:

- a) lorsque le biseau de contact α est égal à zéro:
 - 1) dans un système de pression radiale (tel qu'un ressort de compression qui agit directement sur la tête): sans aucun biseau de tête, comme cela est représenté à la Figure 4a);
 - 2) dans un ressort à ruban rouleau: avec un biseau de tête adéquat β (par exemple, 22,5°), comme cela est représenté à la Figure 4b);
- b) avec un biseau de tête adéquat β lorsque l'angle d'inclinaison α est compris entre 7,5° et 8° (Figure 4c).

Les angles de biseau doivent être consignés dans le rapport d'essai.



Légende

α Biseau de contact

β Biseau de tête

r_H Dimension radiale du porte-balais

F_p Force appliquée par le système de pression

ω Vitesse angulaire (sens de rotation)

Figure 4 – Configuration de porte-balais

La pression spécifique du balai exigée p , telle que définie en 5.2, doit être dans une tolérance de ± 5 % entre les balais.

La force de pression F_p du système de ressort doit être définie en fonction de la surface de contact du balai S et de la pression spécifique du balai p exigée, à l'aide de la formule (3) définie en 3.1.10.

Il est recommandé de mesurer la force de pression F_p conformément à l'IEC/TR 61015. D'autres appareils de mesure peuvent être utilisés, par exemple, des dynamomètres. Tous les appareils doivent avoir une précision satisfaisante (écart maximal de 2,5 %).

NOTE Lorsqu'une bague d'essai de type collecteur est appliquée, les dimensions des rainures ne sont pas prises en considération pour le calcul de la pression du balai.

4.1.5 Alimentation électrique

4.1.5.1 Généralités

Quel que soit son type, il convient que l'alimentation choisie puisse maintenir le courant de charge choisi à la valeur exigée pour l'essai en cours, à ± 5 % près, et répondre rapidement aux variations de la tension de contact.

4.1.5.2 Alimentation en courant continu

4.1.5.2.1 Génératrice à courant continu

La génératrice doit pouvoir répondre à la demande maximale probable lorsqu'une résistance ballast de stabilisation est insérée dans le circuit des balais d'essai. En variante, une source à courant constant et à faible constante de temps, comme une génératrice de soudage, peut être utilisée.

4.1.5.2.2 Redresseur à diode

Alimenté à partir d'une source de courant alternatif, le redresseur est en mesure de répondre à la demande maximale probable.

Le facteur d'ondulation q_f de la source ne doit pas dépasser 0,05 (5 %). Il convient de consigner cette valeur pour chaque essai.

4.1.5.2.3 Redresseur contrôlé

La spécification du redresseur contrôlé est la même que pour le redresseur à diode (4.1.5.2.2).

4.1.5.3 Alimentation en courant alternatif

L'alimentation en courant alternatif, par exemple, un onduleur, doit être choisie de manière à pouvoir obtenir une onde sinusoïdale pratiquement pure dans la plage de courants exigée.

4.1.6 Instrumentation

4.1.6.1 Coefficient de frottement

4.1.6.1.1 Généralités

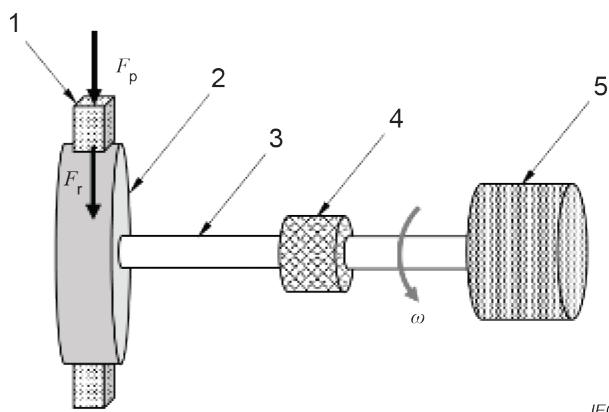
Deux systèmes principaux sont habituellement utilisés pour mesurer le coefficient de frottement. Ils sont présentés en 4.1.6.1.2 et 4.1.6.1.3. Quel que soit le système utilisé, il ne doit occasionner que des perturbations négligeables de la stabilité mécanique et des performances électriques des balais.

De nombreux systèmes mécaniques appropriés peuvent être employés pour réaliser ce mesurage et il convient que tous soient acceptables à condition que leur précision soit conforme à 4.1.6.1.6.

4.1.6.1.2 Méthode a): Mesurage des forces tangentielles agissant sur la surface tournante

Cette méthode consiste à mesurer le couple mécanique avec et sans les balais, dans les mêmes conditions de fonctionnement du moteur d'entraînement et avec les mêmes paramètres (J_B , pression, HR , etc.) pour les balais et le système d'excitation. Le coefficient de frottement peut ensuite être déterminé à partir de la relation entre le couple et la force étalonnée appliquée sur le balai (il convient qu'elle soit normale et constante) selon la formule (14) spécifiée en 6.4.1.

La Figure 5 est un croquis simplifié qui clarifie la méthode de mesure du coefficient de frottement à l'aide de la méthode a).



IEC

Légende

- 1 Balai
- 2 Bague d'essai
- 3 Arbre
- 4 Couplemètre
- 5 Moteur d'entraînement
- ω Vitesse angulaire
- F_r Force de réaction de la bague
- F_p Force appliquée sur le balai par le système de pression

Figure 5 – Mesurage du couple mécanique par la méthode a)

NOTE Avec la configuration de banc d'essai de la Figure 5, le porte-balais est radial par rapport à la bague. Par conséquent, la valeur numérique de F_r est égale à la valeur numérique de F_p (les sens sont opposés, mais les valeurs absolues sont identiques).

Il est recommandé de réduire autant que possible les vibrations sur le banc d'essai. Un accéléromètre peut être utilisé pour contrôler les vibrations pendant la durée de l'essai.

4.1.6.1.3 Méthode b): Mesurage des forces tangentielles agissant sur le balai**4.1.6.1.3.1 Principe général**

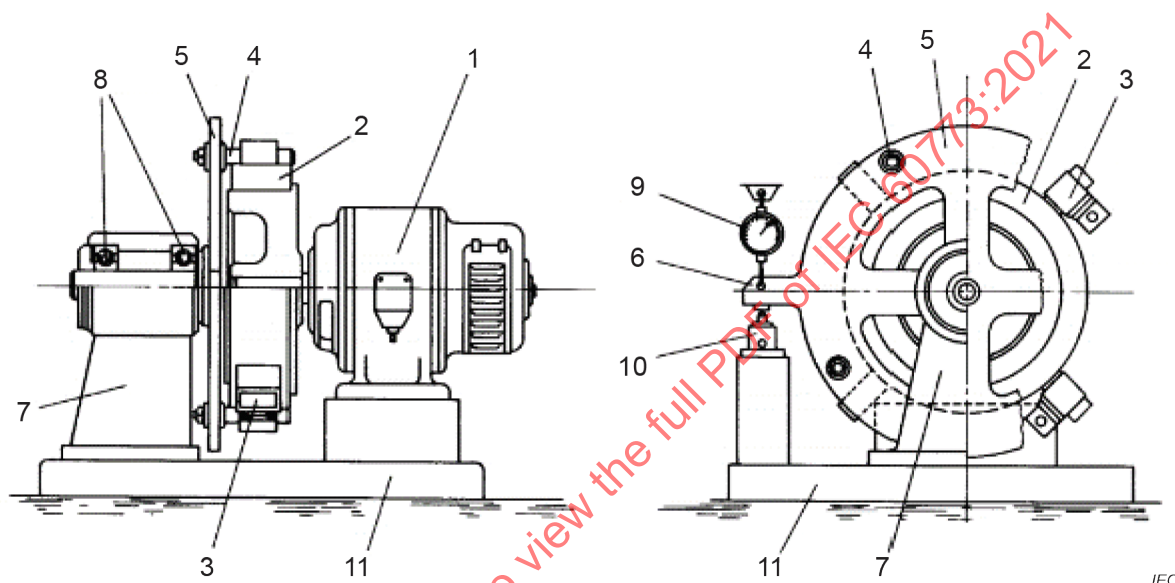
La Figure 6 représente la conception fondamentale d'une configuration de banc d'essai. Le banc d'essai doit satisfaire aux exigences suivantes:

- Les axes de rotation de la bague et de la couronne porte-balais doivent être aussi concentriques que possible.
- L'ensemble dynamométrique doit être mécaniquement "raide" (c'est-à-dire rigide) et avoir la masse maximale possible afin de constituer un amortisseur efficace pour les vibrations à haute fréquence engendrées par les balais soumis à l'essai.
- De grandes précautions doivent être prises pour assurer un frottement minimal dû aux paliers de la couronne porte-balais afin de ne pas altérer la force mesurée due au frottement des balais.
Il convient que le déplacement tangentiel relatif des balais par rapport à la gaine ne dépasse pas 0,5 mm. À cet effet, le mouvement angulaire de la couronne porte-balais doit être limité. Un moyen de blocage du mouvement de la couronne dans le sens de rotation de la bague doit être ajouté. À cet effet, un câble peut être fixé sur le bras de levier.
- Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes acceptables, aussi bien mécaniques qu'électriques, destinés à mesurer la force de frottement des balais. Il convient de choisir un système approprié pour la conception du dynamomètre dans la liste suivante:
 - a) capteur de contrainte;

- b) capteur dynamométrique;
- c) détecteur de déplacement;
- d) transformateur différentiel;
- e) levier et poids;
- f) peson à ressort.

Les appareils a) à d) admettent l'utilisation d'appareils enregistreurs pour les mesurages en continu.

La méthode préférentielle utilise un capteur dynamométrique (élément b) ci-dessus et élément 10 à la Figure 6) équipé d'une connexion pour enregistrer la tension de sortie.



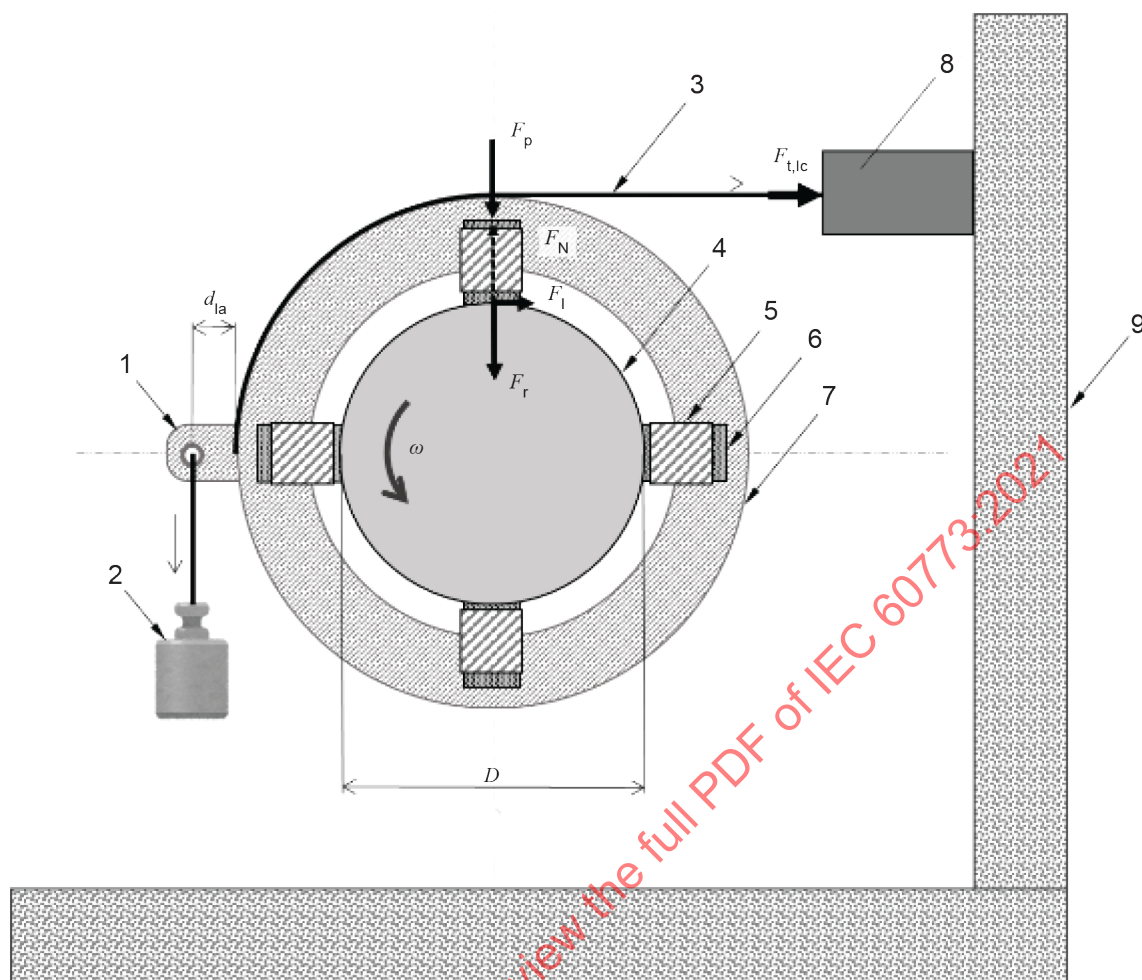
Légende

- 1 Moteur à courant alternatif ou entraînement à vitesse variable
- 2 Bague d'essai
- 3 Porte-balais et balai
- 4 Tige support de porte-balais
- 5 Couronne porte-balais
- 6 Levier du dynamomètre
- 7 Logement de palier du dynamomètre et son support
- 8 Paliers du dynamomètre
- 9 Dispositif de mesure de la force (peson à ressort)
- 10 Capteur dynamométrique électrique
- 11 Plaque d'embase

Figure 6 – Machine pour essais de balais selon la méthode b)

4.1.6.1.3.2 Principe de la méthode avec le capteur dynamométrique

La Figure 7 donne une représentation de ce principe. La couronne porte-balais est mobile sur son axe de rotation. Le capteur de contrainte est connecté à la couronne porte-balais à l'aide d'un câble. Le câble est fixé sur un bras de levier intégré à la couronne. Pour anticiper le mouvement de la couronne lorsque la bague tourne, une tare (de masse connue) est suspendue au bras de levier.



IEC

Légende

- 1 Bras de levier
- 2 Tare
- 3 Câble
- 4 Bague d'essai
- 5 Porte-balais
- 6 Balai
- 7 Couronne libre
- 8 Capteur de contrainte
- 9 Support du banc d'essai
- ω Vitesse angulaire (sens de rotation)
- F_r Force dans le sens radial
- F_t Force dans le sens tangentiel
- F_p Force du ressort appliqué sur le balai
- $F_{t,lc}$ Force tangentielle mesurée par le capteur dynamométrique
- F_N Force normale

Figure 7 – Configuration de banc d'essai avec un capteur dynamométrique

La masse de la tare m_T est choisie de manière à bloquer le déplacement de la couronne dans le sens de rotation de la bague et à assurer une tension appropriée du câble. Étant donné que la tare contribue aux forces qui agissent sur la couronne, sa valeur de masse doit nécessairement être prise en compte dans les calculs.

La force tangentielle est mesurée directement par le capteur dynamométrique lorsqu'il est convenablement réglé.

Le réglage du capteur dynamométrique peut être réalisé par différentes méthodes. Une méthode est décrite à l'Article A.2.

NOTE Le banc d'essai décrit à la Figure 7 utilise un porte-balais radial.

4.1.6.1.4 Étalonnage

Pour obtenir des valeurs précises, les capteurs (capteur dynamométrique, couplemètre, etc.) doivent être étalonnés régulièrement. Une période de 3 mois est recommandée pour assurer l'absence d'écart.

NOTE L'étalonnage concerne l'appareil d'essai lui-même, alors que le réglage se rapporte au calcul d'une grandeur physique à partir des valeurs de sortie de l'appareil d'essai.

Pour une plus grande précision, le frottement de l'air peut être pris en compte. Étant donné que le mesurage du frottement résiduel dépend de la vitesse, il doit être réalisé à des valeurs de vitesse différentes.

4.1.6.1.5 Réglage

Lorsque la méthode b) avec un capteur dynamométrique est utilisée, la force tangentielle est mesurée directement par le capteur dynamométrique par un réglage. Le réglage du capteur dynamométrique peut être réalisé par différentes méthodes. Une méthode est décrite à l'Article A.2.

4.1.6.1.6 Précision

Des appareils d'une précision jusqu'à 5 % sont appropriés.

4.1.6.1.7 État stable

Le coefficient de frottement est considéré comme pratiquement stable lorsque l'écart par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 5 %.

4.1.6.2 Chute de tension

4.1.6.2.1 Généralités

La chute de tension est déterminée à l'aide d'un appareil qui permet de mesurer la tension entre 2 points de contact, l'un sur le balai et l'autre sur la bague.

Les dispositions du 4.1.6.2.2 spécifient les appareils de mesure de la tension.

L'électrode de contact de la bague est spécifiée en 4.1.6.2.3.

L'emplacement du point de contact sur le balai dépend du type de chute de tension destiné à être déterminé (chute de tension au contact ou chute de tension totale – voir l'Article 7) et les électrodes de contact de balai sont décrites en 4.1.6.2.4.

4.1.6.2.2 Appareils de mesure de la tension

4.1.6.2.2.1 Appareils de mesure de la tension en courant continu

Tout voltmètre à courant continu avec une résistance interne d'au moins 1 000 Ω/V est approprié. Lorsqu'un appareil à aiguille est utilisé, l'indication minimale ne doit alors pas se situer en dessous de 20 % de la pleine échelle.

4.1.6.2.2.2 Appareils de mesure de la tension en courant alternatif

En courant alternatif, il convient de mesurer la chute de tension au contact à l'aide d'un appareil capable de mesurer la valeur efficace vraie. De tels appareils sont:

- a) les appareils à thermocouple,
- b) les appareils électrodynamiques sans fer,
- c) tout appareil électronique capable de mesurer la valeur efficace vraie.

L'impédance interne doit être conforme aux spécifications de 4.1.6.2.2.1.

Les multimètres du type à redresseur ne sont pas recommandés.

Il est fortement recommandé de choisir un appareil compatible avec un système d'acquisition de données afin de pouvoir mesurer et consigner la tension en continu au cours d'un essai.

4.1.6.2.2.3 Précision

Des appareils d'une précision jusqu'à 2,5 % sont appropriés.

4.1.6.2.2.4 État stable pour la tension

La chute de tension est considérée comme pratiquement stable lorsque l'écart par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 5 %.

4.1.6.2.3 Électrode de la partie tournante

L'électrode de contact à appliquer sur la partie tournante doit être construite de telle manière que son influence sur la valeur de la tension mesurée soit négligeable. Il existe différentes méthodes acceptables de fabrication de cette électrode, par exemple:

- a) un petit balai métallographique qui frotte sur la partie tournante en dehors de la piste du balai d'essai (généralement constitué de graphite et d'argent),
- b) un "balai" constitué de fils fins de cuivre (câble de balai) appliqué de la même manière que le balai métallographique (voir point a) ci-dessus),
- c) une bague de mesure supplémentaire connectée électriquement à la bague d'essai et équipée de balais de mesure,
- d) un système de transmission au mercure.

Le type d'électrode de contact dépend de l'appareil utilisé pour mesurer la tension.

Quel que soit le type d'électrode utilisé, a) ou b), le point d'application sur la partie tournante doit être situé en dehors de la ou des pistes du balai d'essai. Il est recommandé d'appliquer l'électrode de contact sur la partie disque de la bague.

4.1.6.2.4 Électrode de contact du balai

4.1.6.2.4.1 Généralités

L'électrode de contact du balai doit être appliquée sur le balai de manière à ne pas perturber le fonctionnement du balai. L'électrode peut être fixée de manière permanente au balai ou au porte-balais, ou peut être appliquée à la main.

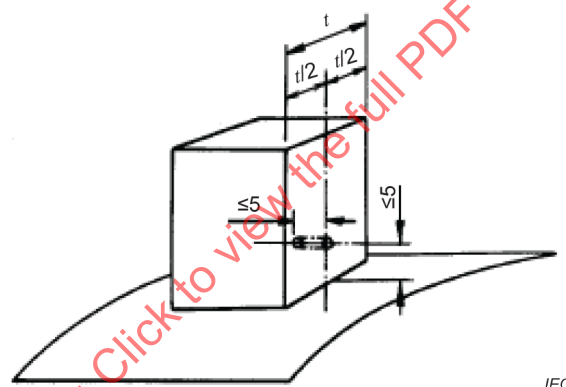
4.1.6.2.4.2 Électrode de balai de type 1) pour la tension totale du balai U_B

L'électrode doit être appliquée sur la cosse du balai.

Lorsque des appareils enregistreurs portatifs sont utilisés, il est recommandé d'employer une électrode pointue en acier inoxydable.

4.1.6.2.4.3 Électrode de balai de type 2) pour la tension au contact du balai U_c

L'électrode de contact placée sur ou dans le balai ne doit pas se trouver à plus de 5 mm de la surface de contact et doit être à une distance de 5 mm de l'axe du balai, comme cela est représenté à la Figure 8.



Dimensions en millimètres

Figure 8 – Point d'application de l'électrode de contact du balai pour U_c

4.1.6.3 Appareils de mesure de la température

4.1.6.3.1 Généralités

Les appareils de mesure de la température dépendent de l'emplacement des points de mesure de la température et de la plage de températures. Par conséquent, les appareils à appliquer sur les balais et les bagues peuvent être différents.

Les normes IEC 60751 et 60584-1 décrivent certains appareils de mesure.

4.1.6.3.2 Température des balais

Pour mesurer la température des balais, les capteurs suivants doivent être utilisés:

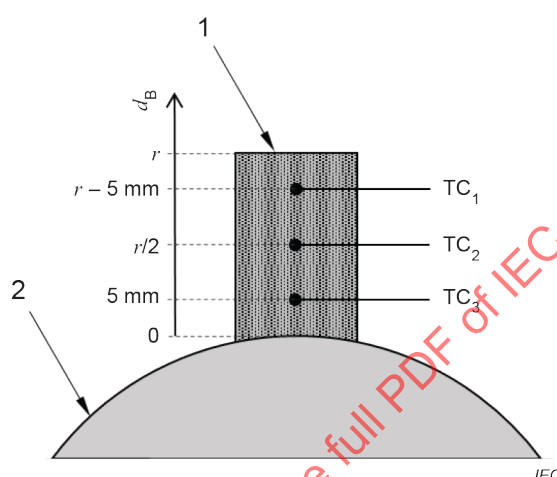
- un capteur thermométrique en platine, tel que spécifié dans l'IEC 60751,
- des thermocouples, tels que spécifiés dans l'IEC 60584-1.

L'avantage du premier est la linéarité entre la température et la valeur de résistance de sortie. Un exemple type est le capteur Pt100 dont la valeur de résistance type est de 100 Ω à 0 °C.

Toutefois, les thermocouples sont faciles à appliquer en raison de leurs plus petites dimensions, mais il est nécessaire de les choisir avec attention et de les étalonner correctement.

Pour le mesurage de la température de répartition à l'intérieur des balais, des thermocouples (TC) doivent être insérés en trois points sur la ligne médiane du balai, comme cela est représenté à la Figure 9:

- TC₁ à 5 mm de la tête du balai (la distance d_B est donc égale à $r-5$ mm),
- TC₂ au centre du balai (la distance d_B est donc égale à $r/2$) et
- TC₃ à 5 mm de la surface de contact (la distance d_B est donc égale à 5 mm).



Légende

- 1 Balai
- 2 Bague d'essai
- TC_i Position du thermocouple numéro i
- r Dimension radiale du balai
- d_B Distance dans le balai suivant le sens r par rapport à la surface de contact

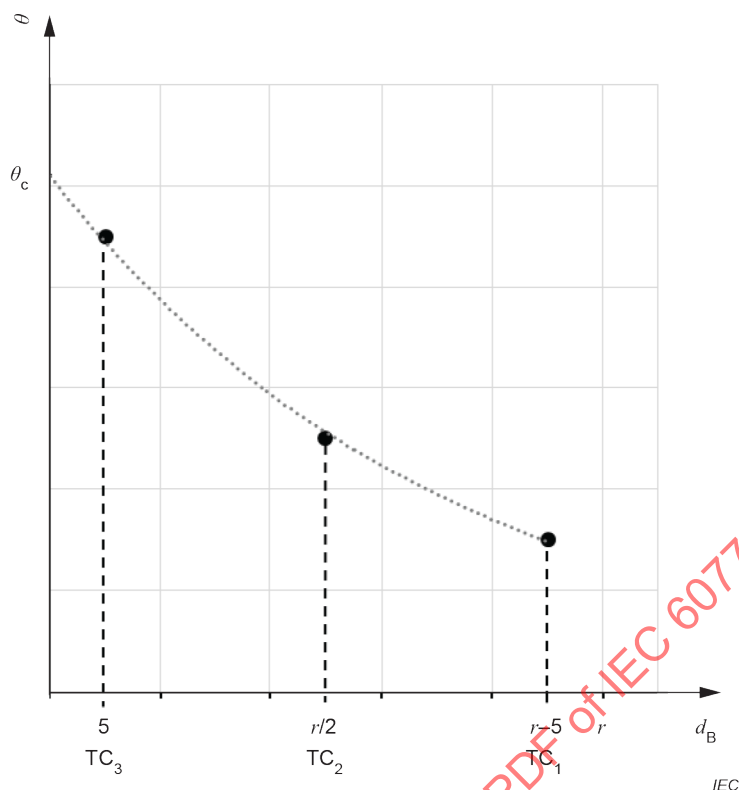
Figure 9 – Position d'insertion des thermocouples

Il est recommandé d'indiquer la conductivité thermique de la nuance de balai dans le rapport d'essai.

La température au niveau de l'interface balai/bague θ_c doit être mesurée par:

- des capteurs de température intégrés dans la bague (voir 4.1.6.3.3), ou
- par extrapolation des valeurs lues à l'aide des trois thermocouples intégrés TC1, TC2 et TC3, comme cela est représenté à la Figure 10, par l'application d'une régression linéaire avec une fonction exponentielle.

NOTE Pour un degré de précision plus élevé, l'évaluation peut être fondée sur les conductivités thermiques et la température mesurées à l'aide des thermocouples TC1, TC2 et TC3 sur l'axe du balai.



Légende

- d_B Distance dans le sens radial entre la surface de contact et la tête du balai
- r Dimension radiale du balai
- TC_i Position du thermocouple numéro i
- θ Température
- θ_c Température de contact

Figure 10 – Évaluation de la température de contact θ_c par interpolation

4.1.6.3.3 Température des bagues

Deux méthodes principales sont recommandées pour le mesurage de la température des bagues:

- a) un thermocouple (conforme à l'IEC 60584-1) ou tout type de pointe de touche pour thermocouple (par exemple un pyromètre de surface qui intègre des thermocouples);
- b) un thermomètre à résistance (conforme à l'IEC 60751).

Une autre méthode est également possible, dans laquelle un thermocouple peut être intégré dans la bague pendant sa construction et les fils ramenés à deux bagues auxiliaires de mesure ou un appareil de télémessure montés sur le même axe que la bague d'essai. Lorsque cette méthode de mesure est adoptée, les bagues auxiliaires doivent être constituées de cuivre, de cuivre argenté ou d'argent et avoir le plus petit diamètre possible. La tension de sortie du thermocouple doit être collectée à l'aide d'au moins deux balais graphite-argent par bague. Ces bagues auxiliaires doivent être protégées contre les effets thermiques extérieurs. Pour les applications dans lesquelles des bagues en acier avec rainures sont courantes, ces bagues peuvent également être utilisées pour les essais. De plus, la conductivité thermique de l'acier et la position exacte des thermocouples doivent être prises en considération pour extrapoler avec un degré de précision raisonnable les températures de surface des bagues à partir des bases.

Les méthodes a) et b) donnent une température moyenne de la bague, alors que la méthode qui utilise un thermocouple intégré dans la bague donne une répartition de la température de la bague. Quoi qu'il en soit, lorsque la dernière méthode est utilisée, une attention particulière doit être accordée lors de l'interprétation.

Lorsque cela est possible, il convient d'établir une courbe de refroidissement "température/temps" pour chaque machine d'essai, en particulier lorsqu'un nouvel essai est planifié.

Un thermomètre à réservoir n'est pas recommandé.

Il convient de ne pas utiliser de caméra infrarouge pour mesurer la température de surface des bagues en raison de sa faible exactitude et de son manque de précision. Quoi qu'il en soit, il peut être utile pour l'interprétation d'obtenir la répartition de température dans l'environnement du balai/de la bague.

4.1.6.3.4 Précision

L'appareil utilisé doit permettre de mesurer la température avec une précision de $\pm 0,5$ K ou mieux.

4.1.6.3.5 Étalonnage

Les capteurs de température, tels que les thermocouples, doivent être étalonnés périodiquement. Une période de 3 mois est recommandée pour assurer que la relation entre la tension et la température n'a pas subi de dérive.

4.1.6.3.6 État stable pour la température

La caractéristique de température est considérée comme pratiquement stable lorsque l'écart par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 1 K.

4.1.6.4 Appareils de mesure des dimensions des balais

4.1.6.4.1 Appareil de mesure

Le choix de l'appareil utilisé pour effectuer ces mesurages (micromètre, pied à coulisse ou jauge de profondeur) dépend largement de l'importance de l'usure observée.

Pour mesurer des balais de forme compliquée, un gabarit approprié, monté avec le micromètre, peut être prévu de manière que le balai à mesurer soit fixe et positionné correctement. De plus, la forme des touches du micromètre est choisie en fonction du profil du balai à mesurer.

4.1.6.4.2 Précision

L'appareil utilisé doit permettre de mesurer l'usure avec une précision de $\pm 2,5$ % ou mieux.

4.1.6.4.3 Étalonnage

Les appareils de mesure des dimensions doivent être étalonnés périodiquement. Une période de 1 an est recommandée.

4.1.6.5 Appareils de mesure du courant

4.1.6.5.1 Appareil de mesure

Tout dispositif de mesure d'essai approprié peut être utilisé. Une méthode simple consiste à utiliser un ampèremètre à pince pour mesurer le courant qui circule dans les câbles de chaque balai. Des capteurs à effet Hall ou un oscilloscope peuvent également être utilisés.

Lors du choix du dispositif d'essai, une attention particulière doit être accordée au type de courant à mesurer (certains dispositifs ne permettent pas de mesurer un courant alternatif) et à la sensibilité (au courant alternatif et au courant continu).

4.1.6.5.2 Précision

L'appareil utilisé doit permettre de mesurer le courant avec une précision de $\pm 0,5\%$ ou mieux.

4.1.6.5.3 Étalonnage

Les appareils de mesure du courant doivent être étalonnés périodiquement. Une période de 1 an est recommandée.

4.1.6.5.4 État stable

Le mesurage du courant est considéré comme stable lorsque l'écart en pourcentage par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 5 %.

4.1.6.6 Vitesse périphérique

4.1.6.6.1 Généralités

La caractéristique de vitesse périphérique v_p est calculée à partir de la vitesse de rotation mesurée de la bague et du diamètre de la bague à l'aide de la formule (7) définie en 3.1.22.

4.1.6.6.2 Appareil de mesure de la vitesse de rotation

Tout dispositif de mesure d'essai approprié peut être utilisé. Une méthode simple consiste à utiliser un stroboscope. Pour une plus grande précision et un mesurage automatique, un compteur de tours peut être installé sur le banc d'essai.

4.1.6.6.3 Précision

L'appareil utilisé doit permettre de mesurer la vitesse avec une précision de ± 50 tr/min ou mieux.

4.1.6.6.4 État stable

La caractéristique de vitesse est considérée comme stable lorsque l'écart par rapport à la valeur moyenne d'au moins 3 mesures consécutives est inférieur à 2,5 %.

4.2 Spécification du banc d'essai pour les collecteurs

4.2.1 Généralités

Pour un fonctionnement en courant continu, le banc d'essai n'est pas exactement un collecteur réel, c'est-à-dire que la conception de la bague d'essai simule le comportement mécanique par l'utilisation de rainures usinées suivant le sens axial, mais n'introduit pas de commutation.

4.2.2 Bagues d'essai

4.2.2.1 Matériau

Il convient que le matériau des bagues d'essai soit conforme à l'application d'une machine à courant continu. La bague d'essai doit être en cuivre, comme cela est spécifié dans l'IEC 60356.

4.2.2.2 Dimensions des bagues d'essai

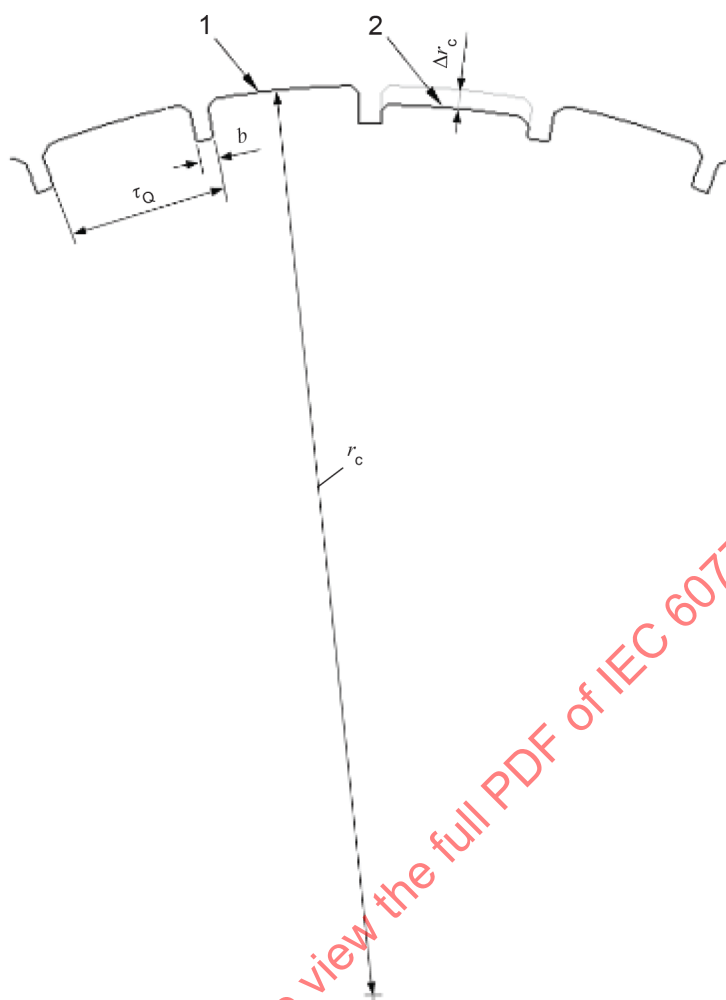
Le diamètre D de la bague d'essai ne doit pas être inférieur à 200 mm ni supérieur à 300 mm. La dimension préférentielle est de 220 mm.

La longueur axiale de la bague rainurée doit être égale à la dimension a du balai d'essai, plus 6 mm au moins.

Des rainures axiales, également espacées sur la surface de la bague, doivent être fraisées de manière à obtenir un pas de rainure τ_Q compris entre 5,0 mm et 7,5 mm. La largeur b des rainures doit être comprise entre 0,8 mm et 1 mm et leur profondeur entre 1 mm et 3 mm. Chaque segment doit avoir le même rayon que celui de la bague entière.

Pendant la préparation, l'emploi d'un papier abrasif ou d'une toile abrasive pour éliminer les traces d'outil et/ou une surface trop polie doit être limité afin d'éviter un "bombé" des lames. Voir la Figure 11.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60773:2021



IEC

Légende

- r_c Rayon de la bague d'essai
- Δr_c Différence entre le rayon de la bague d'essai et le rayon d'une lame "bombée"
- b Largeur de rainure
- τ_Q Pas de rainure
- 1 Lame normalisée (avec un rayon r_c)
- 2 Lame "bombée" (avec un rayon $r_c - \Delta r_c$)

Figure 11 – Représentation des dimensions et de la préparation des rainures de lames

Les dimensions τ_Q et b doivent être choisies avec attention afin d'éliminer le risque de résonance mécanique en prenant en considération le nombre de segments recouverts par le balai (également appelé taux de recouvrement τ_B). Les formules (11) et (12) donnent la relation entre τ_Q , t et b :

$$k \times \tau_Q \neq q \quad (11)$$

et

$$t - b < q < t + b \quad (12)$$

où

- k est un nombre entier choisi parmi les valeurs 2, 3 ou 4;
- q est un nombre variable;
- t est la dimension tangentielle du balai;
- b est la largeur de rainure;
- τ_Q est le pas de rainure.

En d'autres termes, le taux de recouvrement du balai τ_B ne doit pas être un nombre entier. Les valeurs préférentielles de τ_B doivent être choisies entre 3 et 6, avec une première décimale aussi proche que possible de 5.

Exemple: 3,5 ou 4,5.

La Figure 12 présente un exemple de recouvrement correct ou incorrect du balai.

NOTE Pour être plus complet, une méthode pratique pour déterminer pas à pas les dimensions appropriées est proposée ci-dessous:

- a) La dimension t doit être choisie parmi les valeurs préférentielles indiquées dans le Tableau 1.
- b) Choisir une valeur de τ_Q comprise entre 5,0 mm et 7,5 mm.
- c) Vérifier si τ_Q est approprié:
 - 1) Calculer le nombre de rainures Q en appliquant la formule (5). Le résultat doit être un nombre entier. Sinon, revenir à b).
 - 2) Calculer le taux de recouvrement τ_B (nombre de segments recouverts par le balai) à l'aide de la formule (6).
- d) Lorsque τ_B est un nombre entier, choisir une autre valeur de τ_Q :
 - 1) Calculer à nouveau τ_Q à partir d'une valeur de τ_B proche de la précédente avec une première décimale égale à 5 (voir l'exemple ci-dessous).
 - 2) Calculer à nouveau Q à l'aide de la formule (5). Lorsque le résultat n'est pas un nombre entier, arrondir à l'entier le plus proche et calculer à nouveau τ_Q et τ_B (voir l'exemple ci-dessous).
- e) Choisir une valeur de b comprise entre 0,8 mm et 1,0 mm.
- f) Vérifier si b est approprié selon les formules (11) et (12).

Exemple: diamètre de la bague D : 220 mm.

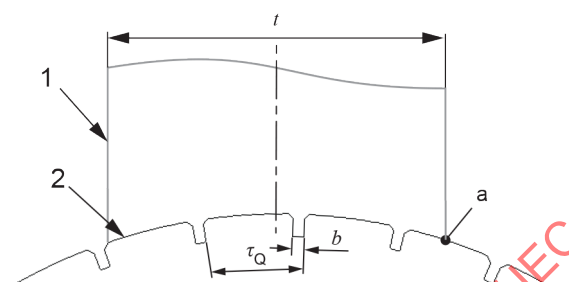
- a) Choisir une dimension tangentielle de balai t : 25 mm.
- b) Choisir la largeur τ_Q : 5 mm.
- c) Calculer ensuite Q et τ_B :
 Formule (5) $Q = D / \tau$ la valeur numérique est 44: nombre entier – valide.
 Formule (6) $\tau_B = t / \tau_Q$ la valeur numérique est 5: nombre entier – non valide. La valeur de τ_Q doit donc être modifiée.
- d) Choisir une nouvelle valeur de τ_B avec une première décimale égale à 5: 4,5.
 Calculer ensuite la valeur numérique de τ_Q : 5,55 mm et de Q : 39,6.
 Q est non valide, car il ne s'agit pas d'un nombre entier. Il doit être arrondi à l'entier le plus proche: 40.
 Calculer ensuite à nouveau la valeur numérique de τ_Q : 5,5 mm et de τ_B : 4,54. Tous les critères sont satisfaits.
- e) Choisir une largeur de rainure b : 0,8 mm. Calculer ensuite:

- f) $t - b$ la valeur numérique est 24,2 mm et $t + b$ la valeur numérique est 25,8 mm

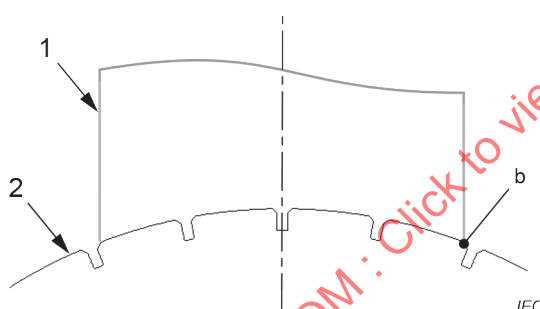
Calcul de $k \times \tau_Q$ pour différentes valeurs de k :

k	2	3	4
$k \times \tau_Q$ (mm)	11	16,5	22

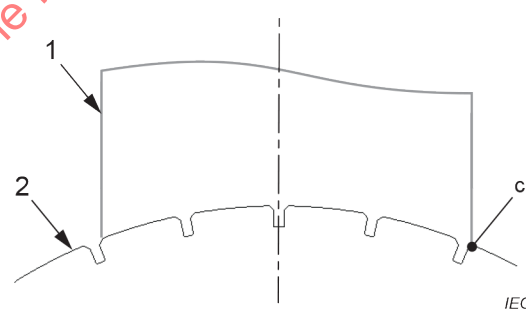
Toutes les valeurs de $k \times \tau_Q$ sont inférieures à 24,2 mm. Cela signifie que la valeur numérique de b de 0,8 mm est correcte.



a) Correct



b) Incorrect



c) Incorrect

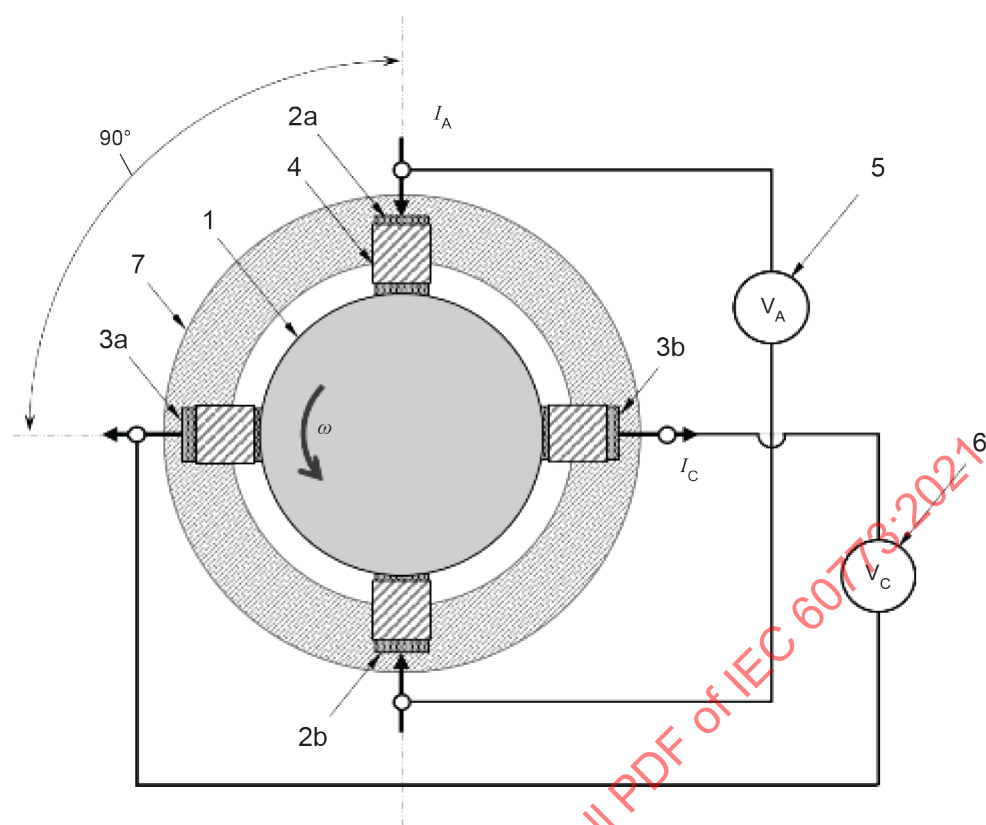
Légende

- 1 Balai
- 2 Porte-balais
- a Recouvrement correct du balai: 3,5 (3 segments + 3 rainures + ½ segment)
- b Recouvrement incorrect du balai: 3,9 (4 segments + 3 rainures)
- c Recouvrement incorrect du balai: 4 (4 segments + 4 rainures)

Figure 12 – Recouvrement du balai

4.2.3 Disposition des balais

De préférence, quatre balais également espacés autour de la bague d'essai doivent être utilisés, comme cela est indiqué à la Figure 13. La polarité des balais doit être alternée.



IEC

Légende

- 1 Bague
- 2 Balai positif (balai anode) a et b
- 3 Balai négatif (balai cathode) a et b
- 4 Porte-balais
- 5 Voltmètre V_A pour la chute de tension totale au contact du balai positif
- 6 Voltmètre V_C pour la chute de tension totale au contact du balai négatif
- 7 Collier porte-balais
- I_A Courant dans le balai anode
- I_C Courant dans le balai cathode

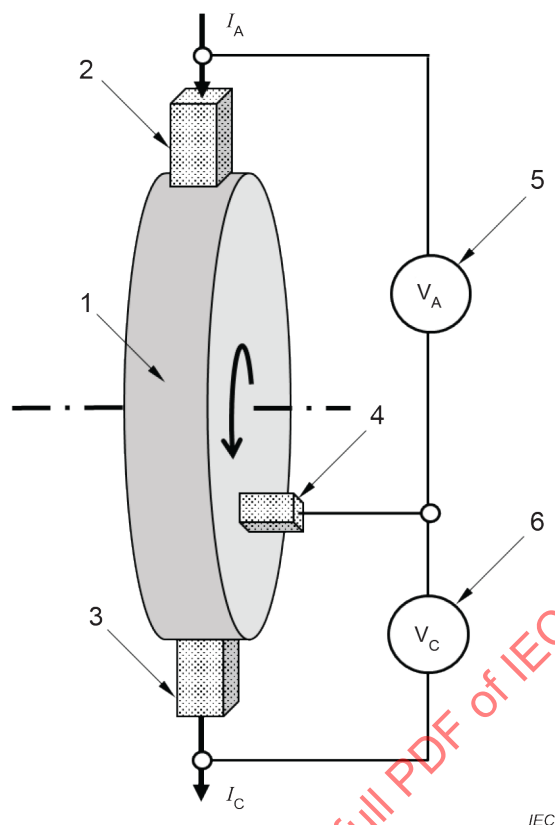
Figure 13 – Configuration des balais

Lorsqu'il est nécessaire, pour une raison quelconque, d'utiliser deux balais seulement, il convient alors que l'écart angulaire de ces balais soit compris entre 90° et 180°.

4.2.4 Balai spécial pour le mesurage de la chute de tension

Les balais sont disposés par paire: un positif pour l'entrée du courant et un négatif pour la sortie du courant. Un balai de contrôle est ajouté sur le côté de la bague. Il doit avoir une chute de tension négligeable. En général, il est constitué de nuance graphite-argent.

La Figure 14 représente une disposition des balais (avec 2 balais) pour le mesurage de la chute de tension totale au contact des balais U_B . Dans cette configuration, la chute de tension U_B est la moyenne de la chute de tension de chaque polarité.



Légende

- 1 Bague
- 2 Balai positif (balai anode)
- 3 Balai négatif (balai cathode)
- 4 Balai de contrôle
- 5 Voltmètre V_A pour la chute de tension totale au contact du balai positif
- 6 Voltmètre V_B pour la chute de tension totale au contact du balai négatif
- I_A Courant dans le balai anode
- I_C Courant dans le balai cathode

Figure 14 – Disposition du balai de contrôle

4.3 Spécification du banc d'essai pour les bagues

4.3.1 Généralités

Hormis les dimensions, le banc d'essai et la disposition des balais doivent être aussi proches que possible de l'application réelle. En particulier, le choix des matériaux est important du point de vue de l'évaluation du coefficient de frottement et de la chute de tension.

4.3.2 Bague

4.3.2.1 Matériaux

Selon l'application, ces bagues peuvent être fabriquées en matériaux non ferreux (bronze, cuivre) ou en matériaux ferreux (acier, acier inoxydable).

L'utilisation d'alliages de cuivre qui contiennent du zinc, du silicium, du plomb, de l'aluminium, du chrome doit être évitée. Ces alliages peuvent affecter le fonctionnement des balais par l'entraînement d'une instabilité mécanique (usure des balais, frottement élevé, etc.).

Pour un usage général, l'utilisation de bronze de type CuSn12 ou CuSn8Ni3P conformément à l'ISO 1190-1 ou d'acier inoxydable de type X10Cr13, qui correspond à 4006-410-00-I conformément à l'ISO 15510, est recommandée.

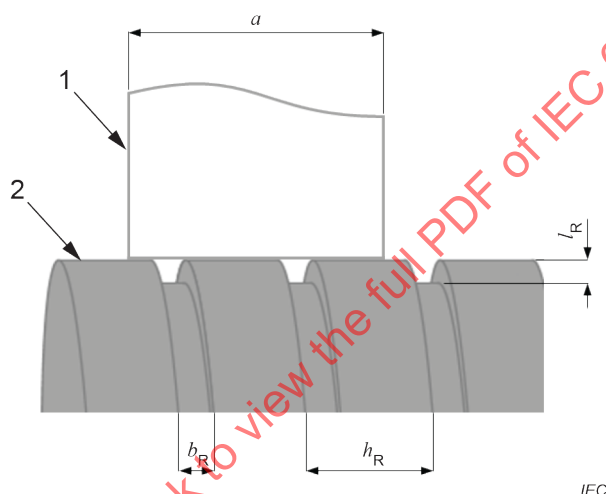
Avec les résultats d'essai, il convient d'indiquer la composition et les caractéristiques mécaniques ou la référence du matériau normalisé ISO de la bague.

4.3.2.2 Dimensions

- a) Ces bagues ne doivent pas avoir un diamètre inférieur à 200 mm et peuvent être lisses ou comporter des rainures hélicoïdales. Le diamètre préférentiel D est de 220 mm.

Le choix du diamètre doit prendre en compte la vitesse périphérique. Dans le cas de grandes dimensions, la stabilité peut diminuer en raison des vibrations. Une valeur maximale de 250 mm est recommandée.

- b) Lorsque les bagues comportent des rainures hélicoïdales, la configuration de la Figure 15 suivante doit être utilisée:



Légende

- 1 Balai
2 Bague à rainures hélicoïdales (bague hélicée)
 a Dimension axiale du balai
 b_R Largeur de rainure
 h_R Pas de rainure
 l_R Profondeur de rainure

Figure 15 – Caractéristiques des rainures

L'hélicage doit être à un seul filet. La profondeur de la rainure l_R est généralement comprise entre 4 mm et 5 mm et ne doit pas être inférieure à 3 mm.

Le pas de rainure h_R doit être un sous-multiple de a (dimension axiale du balai) afin d'éviter des pulsations de pression du balai. Autrement dit, le nombre de rainures sous le balai k_R doit être un entier.

Exemple: Pour un balai avec une dimension a de 25 mm, la valeur numérique du pas h_R est de 12,5 mm.

Il convient que la largeur de rainure b_R soit comprise entre $h_R/3$ et $h_R/4$. Une valeur numérique de 3 mm est recommandée.

L'appareil utilisé pour le mesurage du profil doit être adapté à cette configuration.

- c) Le calcul de la pression (formule (3) définie en 3.1.10) et de la densité de courant J_B (formule (8) définie en 3.1.23) dans les balais doit être effectué comme pour les bagues lisses, autrement dit, l'effet de l'hélicage sur ces grandeurs doit être ignoré.

NOTE Dans le cas d'un hélicage avec une grande largeur de rainure b_R , la densité de courant au contact J_{Bc} peut être une information importante pour l'interprétation. Elle est calculée à l'aide de la formule (8) en remplaçant la section du balai $t \times a$ par la surface de contact réelle du balai:

$$J_{Bc} = \frac{I}{t \times a - b_R \times k_R}$$

où k_R est le nombre (entier) de rainures sous le balai.

4.3.3 Balais

Au moins deux balais par bague doivent être utilisés. Lorsqu'un plus grand nombre de balais par bague est utilisé, les balais doivent être uniformément répartis autour de la bague; la surface de contact totale des balais ne doit, en aucun cas, être supérieure à 15 % de la surface de la bague.

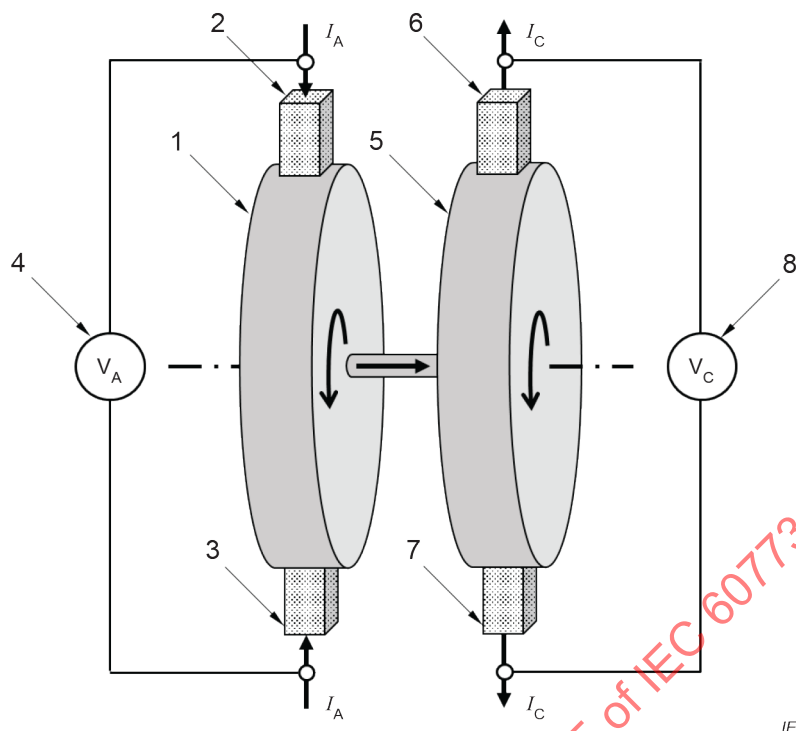
NOTE Pour des essais purement comparatifs, il est considéré que l'utilisation de porte-balais du type "traînant" n'a pas d'effet néfaste et réduit le nombre de types de porte-balais exigé.

4.3.4 Configuration pour un fonctionnement en courant continu et en courant alternatif

4.3.4.1 Pour un fonctionnement en courant continu

Chaque polarité (anode et cathode) doit être soumise à l'essai séparément. Deux méthodes peuvent être employées:

- a) 2 bagues différentes sur le même banc d'essai: une fonctionnant comme une anode, l'autre comme une cathode. Dans ce cas, sur chaque bague, les balais ont la même polarité, comme cela est représenté à la Figure 16.



Légende

- 1 Bague anode
- 2 Balai positif 1 (balai anode)
- 3 Balai positif 2 (balai anode)
- 4 Voltmètre 1 pour la chute de tension totale au contact du balai anode
- I_A Courant dans le balai anode
- 5 Bague cathode
- 6 Balai négatif 1 (balai cathode)
- 7 Balai négatif 2 (balai cathode)
- 8 Voltmètre 2 pour la chute de tension totale au contact du balai cathode
- I_C Courant dans le balai cathode

Figure 16 – Configuration du banc d'essai pour un fonctionnement en courant continu avec 2 balais par polarité

- b) une seule bague: réaliser l'essai tout d'abord en condition d'anode, puis en condition de cathode. Dans cette configuration, un balai supplémentaire est ajouté sur la partie plane de la bague soumise à l'essai pour fermer le circuit.

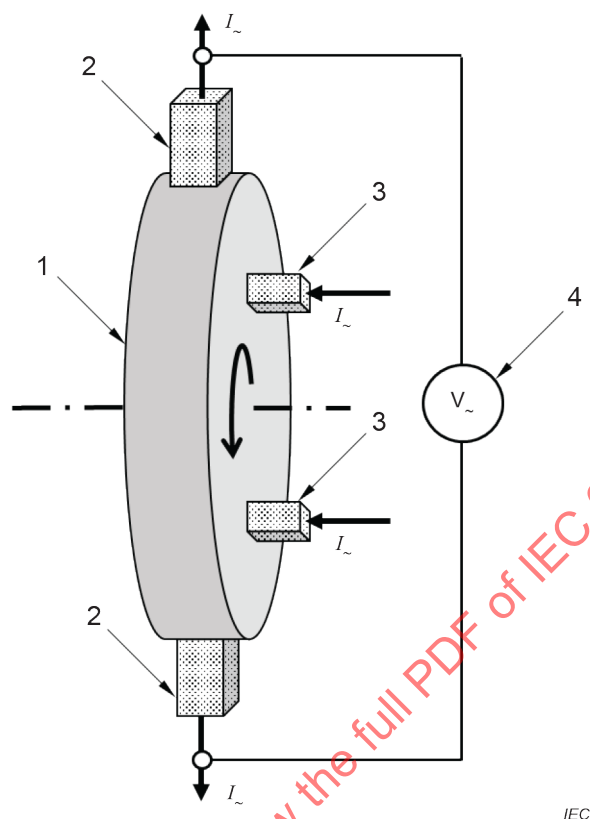
4.3.4.2 Pour un fonctionnement en courant alternatif

Une seule phase est soumise à l'essai. L'alimentation en courant alternatif est connectée d'une part à la bague d'essai, par l'application d'un ou de deux balais supplémentaires sur la partie plane de la bague d'essai, et d'autre part aux balais, comme cela est représenté à la Figure 17.

Comme pour le balai spécial pour le mesurage de la tension spécifié en 4.2.4, les balais supplémentaires pour connecter le courant à la bague d'essai doivent être constitués d'un matériau approprié de sorte que la tension au contact de la bague soit négligeable. Par exemple, une nuance appropriée est choisie dans la famille graphite et argent.

À une vitesse de rotation élevée, la nuance du balai supplémentaire peut être choisie dans la famille du graphite naturel. L'utilisation d'un balai composite constitué d'une couche de nuance

de graphite naturel et d'une couche de nuance de graphite-argent peut également constituer un bon compromis pour réduire à la fois la chute de tension au contact et l'usure.



Légende

- 1 Bague
- 2 Balais d'essai
- 3 Balais supplémentaires
- 4 Voltmètre $V_{\sim}$ pour mesurer la chute de tension totale au contact des 2 balais
- $I_{\sim}$ Courant alternatif

Figure 17 – Configuration du banc d'essai pour un fonctionnement en courant alternatif avec 2 balais

5 Procédure d'essai et conditions de fonctionnement

5.1 Généralités

Le présent article se rapporte à la procédure générale d'essai pour obtenir des mesurages du coefficient de frottement, de la chute de tension et de l'usure.

Les conditions de fonctionnement comprennent (entre autres): le matériau et l'état de surface de la bague ou du collecteur, l'humidité, la température, la pression du balai, la densité de courant, la vitesse périphérique, etc.

Du fait de la nature des matériaux de balais, des variations des conditions ambiantes dans les limites recommandées, etc., une répétabilité absolue des résultats d'essai ne doit pas être envisagée. Lorsque tous les paramètres contrôlables sont maintenus avec précision, les essais répétés effectués sur une même machine et avec les mêmes jeux de balais doivent donner une précision et une répétabilité du coefficient de frottement, de la chute de tension au contact et de l'usure des balais de sorte que chaque mesure soit égale à $\pm 10 \%$ de la moyenne des

résultats obtenus lors des précédents essais. Les remarques ci-dessus impliquent que les essais ont été effectués en suivant strictement le même mode opératoire.

Il est aussi proposé de réserver des jeux de balais d'essai en différents matériaux pour les essais d'étalonnage de la machine. Avant chaque essai, il est recommandé de vérifier la chute de tension dans la connexion et d'effectuer à nouveau les connexions lorsque des variations significatives de cette chute de tension en millivolts apparaissent.

5.2 Conditions d'environnement

5.2.1 Environnement du laboratoire

L'essai doit être effectué à l'intérieur dans un environnement pratiquement exempt de courants d'air, excepté ceux générés par la chaleur émise par l'échantillon soumis à l'essai. Dans la pratique, cette condition est atteinte lorsque la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,5 m/s.

Il convient d'effectuer tous les essais dans une atmosphère pratiquement exempte de poussières, de vapeurs chimiques, etc.

5.2.2 Température de l'air ambiant et température de surface de la bague

La température de l'air ambiant doit être réglée de manière à obtenir la température de surface de la bague appropriée pour un bon fonctionnement du système de balais.

La plage moyenne recommandée de températures de surface de la bague est comprise entre 60 °C et 80 °C. Par conséquent, il peut être nécessaire d'effectuer plusieurs essais pour définir la température appropriée de l'air ambiant dans le local (ou la chambre) dans lequel (ou laquelle) le banc d'essai est installé afin d'atteindre la plage de températures de surface spécifiée ci-dessus pour la bague.

Toutefois, pour comparer des balais d'une même famille de nuance sur un même banc d'essai (dimensions et matériau des bagues, configuration actuelle, etc.), la température ambiante peut ne pas être réglée, à condition que la température de surface de la bague ne diffère pas de plus de 10 °C des limites spécifiées ci-dessus (en d'autres termes, elle doit être comprise entre 50 °C et 90 °C).

Pour assurer une température homogène autour de la bague, un système de ventilation (ou un autre moyen) peut être installé.

La température de l'air ambiant et la température moyenne de surface de la bague doivent être consignées chaque jour pendant les essais et la moyenne doit être consignée dans le rapport d'essai.

5.2.3 Humidité ambiante

L'humidité absolue HA de l'atmosphère du local d'essai (ou de l'enceinte climatique) doit être comprise entre 8 g/m³ et 12 g/m³ pendant toute la durée de l'essai. Elle doit être consignée chaque jour et la moyenne doit être consignée dans le rapport d'essai.

NOTE Lorsqu'un appareil est utilisé pour mesurer l'humidité relative, l'humidité absolue est calculée à partir de l'humidité relative HR et de la température ambiante.

5.3 Conditions de fonctionnement

Les plages de conditions d'essai données dans le Tableau 2 sont les conditions "moyennes" susceptibles d'être rencontrées sur des machines courantes.

Tableau 2 – Conditions d'essai

Symbole	Désignation	Unité	EG	BG	HC-CG	NG	MG ^a
v_p	Vitesse périphérique	m/s	25 à 55	25 à 35	10 à 30	50 à 100	10 à 40
J_B	Densité de courant	A/cm ²	10 à 12,5	5 à 10	6 à 10	8 à 12,5	10 à 35
p	Pression du balai	kN/m ² ^b	18 à 22	18 à 22	18 à 22	13 à 18	18 à 25
^a Les conditions d'essai dépendent du type de nuance métallographique (fritté ou imprégné de métal) et de la teneur en métal. En général, plus la teneur en métal est élevée, plus la vitesse utilisée doit être faible et la densité de courant élevée. ^b Une unité équivalente est le kPa. NOTE Il est proposé d'appliquer la densité de courant moyenne recommandée par le fabricant de balais.							

5.4 Préparation de l'essai et inspection

5.4.1 Généralités

La séquence suivante doit être appliquée avant les essais.

NOTE Le 5.6 spécifie les mesurages et les observations à consigner avant de commencer l'essai.

5.4.2 Banc d'essai

Préparer le banc d'essai comme cela est indiqué à l'Article 4.

Les appareils (et leurs moyens d'enregistrement) doivent être installés sur le banc d'essai et étalonnés et/ou réglés si nécessaire.

5.4.3 Porte-balais

Régler les pressions spécifiées selon le Tableau 2 en 5.3.

5.4.4 Balais d'essai

- Les balais d'essai préparés selon 4.1.3 doivent tous être de la même nuance et du même numéro de lot. La chute de tension dans la connexion U_f des balais d'essai doit être mesurée avant l'essai et il convient de sélectionner pour l'essai des balais avec des valeurs similaires de chute de tension dans la connexion, avec une tolérance non supérieure à ± 20 %.
- Préroder les balais d'essai sur la bague. Vérifier si la surface de contact des balais est ajustée au profil de la bague. Différentes méthodes existent pour cette opération:
 - La méthode préférentielle consiste à utiliser une toile abrasive non conductrice.
 - Utiliser un outil séparé dans lequel une bague tournante, constituée d'un matériau abrasif et de même diamètre que la bague d'essai, est utilisée pour usiner la surface de contact des balais.
 - Appliquer une pierre à grains moyens d'oxyde de silicium ou d'oxyde d'aluminium (pierre à ajuster) sur la bague lorsque les balais sont dans leurs gaines de porte-balais. Dans ce cas, vérifier qu'aucun oxyde ne reste au niveau de la surface de contact du balai et utiliser une pierre à rectifier sur la bague d'essai pour obtenir la rugosité appropriée.
- Après ces opérations, nettoyer soigneusement la bague, les balais et les gaines des porte-balais. Il est recommandé d'utiliser un aspirateur avec une puissance d'aspiration suffisante. Après l'utilisation d'une pierre à ajuster, une attention particulière doit être accordée au nettoyage et à l'aspect de la surface de contact des balais.

5.4.5 Rugosité de la bague

Il convient de mesurer la rugosité R_a et le nombre de pics R_{pc} après le prérodage des balais et avant tout essai. Lorsqu'ils s'écartent de la plage définie en 4.1.2.4, une nouvelle préparation de la surface de la bague doit être effectuée.

5.4.6 Rodage des balais

Le rodage des balais doit ensuite être lancé dans les conditions de vitesse et de densité de courant spécifiées pour l'essai, selon le Tableau 2 et dans les conditions de température de l'air ambiant et d'humidité spécifiées en 5.2.2 et 5.2.3.

Le rodage doit être poursuivi pendant au moins 24 h. Pendant cette période, un examen visuel et des mesurages doivent être effectués, comme cela est exigé en 5.6.4.

Lorsque la patine (film) s'est formée, la température de surface de la bague doit être vérifiée. Lorsqu'elle se situe en dehors de la plage indiquée en 5.2.2, la température ambiante doit alors être corrigée (augmentée ou diminuée) et le rodage doit être poursuivi. Cette opération doit être répétée jusqu'à ce que la température de surface de la bague atteigne la plage recommandée en 5.2.2. Lorsque cette plage n'est pas atteinte, vérifier le banc d'essai et les paramètres, notamment le système de ventilation.

Le rodage est considéré comme achevé de manière satisfaisante lorsque:

- tous les balais sont entièrement rodés, c'est-à-dire que la surface des balais est bien polie uniformément et une patine pratiquement uniforme s'est formée, et
- des mesurages stables ont été effectués conformément aux critères de stabilité pour chaque paramètre (se reporter à chaque paragraphe correspondant).

Lorsque le rodage n'est pas achevé, le fonctionnement doit être maintenu pendant 24 h. Lorsque le rodage n'est toujours pas satisfaisant, arrêter et vérifier le banc d'essai et les appareils.

5.4.7 Mesurage des balais

Tous les balais doivent être numérotés et leur dimension radiale r_0 mesurée. Vérifier si les tolérances entre balai et porte-balais n'ont pas été modifiées pendant l'opération de rodage.

Il est très important de replacer alors chaque balai exactement de la même manière et dans le même porte-balai qu'il occupait durant le "rodage", ainsi que de replacer le système de pression sur la tête du balai exactement dans sa position précédente.

5.5 Séquence d'essai

5.5.1 Début de l'essai

L'essai peut débuter lorsque la préparation du banc d'essai est terminée, comme cela est indiqué en 5.4.

Les paramètres d'essai doivent être établis selon le Tableau 2 et la température de l'air ambiant et l'humidité réglées comme cela est spécifié en 5.2.2 et 5.2.3. Le courant de charge et la vitesse de rotation doivent être appliqués dans les limites de $\pm 5\%$ des valeurs spécifiées.

5.5.2 Durée de l'essai

Lorsque le mesurage de l'usure des balais n'est pas exigé, l'essai doit être poursuivi jusqu'à ce que des valeurs stables de la température de surface de la bague, du coefficient de frottement et de la chute de tension soient obtenues.

En revanche, lorsque le mesurage de l'usure des balais est exigé, cette période doit être étendue à 150 h au minimum, afin de déterminer l'usure moyenne des balais avec une précision satisfaisante.

5.6 Mesurages et observations

5.6.1 Généralités

Les observations et les mesurages spécifiés dans les paragraphes suivants doivent être réalisés avant et/ou pendant la durée de l'essai et/ou après l'essai. Ils doivent être consignés dans un rapport d'essai. Un exemple est donné à l'Annexe C.

Toute anomalie doit être consignée dans le rapport d'essai.

Le rapport d'essai ne doit pas être confondu avec une fiche technique. Le rapport d'essai est un document interne diffusé par le laboratoire qui a réalisé les essais. La fiche technique est un document externe qui contient certaines valeurs moyennes ou certains graphiques destinés à un client (utilisateur de la machine ou fabricant). Toutefois, la fiche doit contenir des données essentielles (paramètres et valeurs moyennes des mesurages) afin d'assurer une bonne compréhension.

5.6.2 Intervalle entre les mesurages

L'intervalle entre les mesurages doit être inférieur à 2 h, excepté pour le mesurage de l'usure des balais pour lequel l'intervalle doit être de 50 h.

5.6.3 Avant de commencer une séquence d'essai

5.6.3.1 Bague

- a) faux-rond (spécification selon 4.1.2.3);
- b) excentricité;
- c) méplats;
- d) aspect et marques de la patine à la surface de la bague (conformément à l'IEC 60276:2018);
- e) rugosité (spécification selon 4.1.2.4);

Pour les bagues collectrices d'essai uniquement (Figure 9):

- f) vérifier l'élévation des lames: trop haute/trop basse;
- g) vérifier les arêtes chanfreinées de chaque lame; confirmer le chanfrein approprié et l'absence de pont de cuivre;
- h) les surfaces des lames et les rainures entre lames doivent être propres et exemptes de saleté (huile ou poussière).

NOTE Un mesurage du profil de la bague (de préférence sur chaque piste de balais lorsque plusieurs pistes sont appliquées) fournit a), b), c) et f).

5.6.3.2 Porte-balais

- a) la pression du balai, qui est déterminée par la force du ressort et la surface du balai S , doit être confirmée selon les spécifications du Tableau 2 pour le type de balai, et ajustée si exigé;
- b) il convient de vérifier la position du porte-balais par rapport à la bague, comme cela est spécifié en 4.1.4 (position radiale et axiale dans la bague et distance entre la bague et le porte-balais);
- c) il convient que les porte-balais soient propres et exempts de saleté (poussière ou huile);
- d) il convient de vérifier le jeu entre le balai et le porte-balais et de le corriger selon les spécifications de l'IEC 60136.

5.6.3.3 Balais

- a) la dimension r_i de chaque balai i doit être mesurée et consignée en fonction de sa position; il convient d'identifier les balais courts et de les remplacer par des balais neufs si nécessaire;
- b) il convient de mesurer les dimensions des balais et leurs tolérances doivent être conformes à l'IEC 60136;
- c) le côté axial a du balai ne doit pas être oblique, mais doit être parallèle à la rainure;
- d) la nuance de balai doit être vérifiée et le numéro de lot doit être consigné;
- e) il convient que toutes les parties mobiles soient libres (par exemple, ressorts).

Il convient de replacer exactement dans la même gaine de porte-balais et dans la même orientation tout balai retiré. Par ailleurs, le système de pression du balai doit être en contact avec la tête du balai exactement dans sa position précédente.

5.6.4 Mesurages pendant une séquence d'essai

Les éléments suivants doivent être mesurés, vérifiés et consignés périodiquement (pour les intervalles, voir 5.6.2):

- a) vitesse de la bague (4.1.6.6),
- b) température de la bague et des balais (4.1.6.3),
- c) courant des balais (4.1.6.5),
- d) coefficient de frottement (selon l'Article 6 et 4.1.6.1),
- e) chute de tension (selon l'Article 7 et 4.1.6.2),
- f) longueur des balais, lorsque cela est exigé (voir 4.1.6.4 et Article 8).

Le courant de charge et la vitesse de rotation doivent être maintenus dans les limites de $\pm 5\%$ des valeurs spécifiées. Les paramètres doivent être réajustés périodiquement si nécessaire.

Lorsqu'une opération est effectuée sur la surface de la bague, il convient alors de vérifier et de corriger, si nécessaire, le positionnement et le rodage des balais.

Durant la séquence d'essai, une observation attentive doit être effectuée pour assurer qu'aucun fonctionnement anormal des balais (broutage, rayures, étincelles, noircissement ou température de surface excessive de la bague, répartition anormale du courant entre les balais, etc.) n'apparaisse. Ces phénomènes peuvent compromettre l'essai. Lorsque l'un des paramètres présente une instabilité, arrêter l'essai et vérifier à nouveau le banc d'essai et les paramètres de fonctionnement. Cette inspection doit être quasiment quotidienne.

5.6.5 Mesurages après une séquence d'essai

Au terme de l'essai, lorsque la machine s'est arrêtée, les éléments suivants doivent être examinés et consignés:

- a) aspect des balais (notamment la surface de contact): la description doit être conforme au 5.7 de l'IEC 60276:2018 et une photographie doit être prise,
- b) aspect de la surface de la bague: la description doit être conforme au 5.6 de l'IEC 60276:2018 et une photographie doit être prise,
- c) rugosité de la bague (R_a et RP_c),
- d) lorsqu'un mesurage de l'usure des balais est exigé: mesurage de la dimension r_i de chaque balai i .

6 Détermination du coefficient de frottement

6.1 Généralités

Le coefficient de frottement μ est impliqué dans les pertes mécaniques des balais, qui peuvent être calculées à l'aide de la formule (13):

$$P_m = 10 \times \mu \times v_p \times F_p \quad (13)$$

où:

P_m représente les pertes mécaniques;

μ est le coefficient de frottement;

v_p est la vitesse périphérique;

F_p est la force appliquée par le système de pression.

Dans la formule (13), le terme "10" provient de la constante de gravité. Pour un calcul précis, il peut être remplacé par sa valeur exacte: 9,807.

Le coefficient de frottement est principalement affecté par la vitesse, la pression spécifique, la densité de courant et la nuance des balais.

Deux méthodes principales sont habituellement utilisées pour mesurer le coefficient de frottement:

- Méthode a): mesurage des forces tangentielles qui agissent sur la surface tournante (voir 4.1.6.1.2);
- Méthode b): mesurage des forces tangentielles qui agissent sur le balai (voir 4.1.6.1.3).

NOTE Bien que les balais anode et cathode puissent présenter des différences de coefficient de frottement, ils sont généralement additionnés et seul le frottement moyen des deux balais est calculé.

6.2 Conditions d'essai

L'essai doit être effectué conformément aux conditions de fonctionnement spécifiées en 5.2 et 5.3.

Étant donné que le coefficient de frottement dépend de la vitesse, l'essai doit être répété avec 5 vitesses différentes, dans la plage spécifiée dans le Tableau 2. L'intervalle entre deux vitesses adjacentes doit permettre de tracer une courbe complète du coefficient de frottement en fonction de la vitesse (voir l'exemple à la Figure 18).

Lorsqu'une dépendance à la densité de courant est attendue, l'ensemble de la séquence d'essai peut être répété à une densité de courant différente dans la plage spécifiée dans le Tableau 2.

6.3 Mesurages

6.3.1 Généralités

Les paramètres des conditions d'essai doivent être contrôlés pendant l'essai et consignés avec les autres mesurages et observations selon 5.6.

Le mesurage du coefficient de frottement doit être enregistré dans des conditions de fonctionnement en régime permanent pendant la durée de l'essai selon 5.5.2.

6.3.2 Configuration du banc d'essai pour la Méthode a)

Lorsque l'instrumentation est utilisée selon la Méthode a), deux mesurages sont nécessaires:

- Mesurage de T_0 : retirer les balais et mesurer le couple à la vitesse périphérique spécifiée.
- Mesurage de T_m : monter les balais sur le banc d'essai et enregistrer les valeurs de couple pendant toute la durée de l'essai.

6.3.3 Configuration du banc d'essai pour la Méthode b)

Lorsque l'instrumentation est utilisée selon la Méthode a), la force mesurée par le capteur $F_{t,lc}$ (voir la Figure 7) doit être consignée pendant toute la durée de l'essai.

6.4 Calcul du coefficient de frottement

6.4.1 Configuration du banc d'essai pour la Méthode a)

Lorsque l'instrumentation est utilisée selon la Méthode a), le coefficient de frottement est calculé à partir des couples mesurés à l'aide de la formule (14):

$$\mu = \frac{T_m - T_0}{F_p \times \frac{D}{2}} \quad (14)$$

où:

T_m est le couple mesuré par le couplemètre;

T_0 est le couple mesuré par le couplemètre sans les balais;

D est le diamètre de la bague;

F_p est la force appliquée sur le balai par le système de pression.

NOTE 1 Les détails du calcul sont décrits à l'Article A.1. de l'Annexe A.

NOTE 2 Lorsque les résultats requièrent une plus grande précision, les pertes inhérentes au moteur d'entraînement peuvent être prises en considération dans les calculs du coefficient de frottement.

6.4.2 Configuration du banc d'essai pour la Méthode b)

F_t est calculée directement à partir de la tension de sortie du capteur dynamométrique. Le réglage du capteur et le calcul sont décrits à l'Article A.2.

F_N (force normale totale qui s'exerce sur l'ensemble des balais) est déterminée à partir de la pression appliquée par le système de pression, déterminée par la formule (15):

$$F_N = N_B \times t \times a \times p \quad (15)$$

où:

N_B est le nombre de balais;

p est la pression;

t, a sont les dimensions du balai.

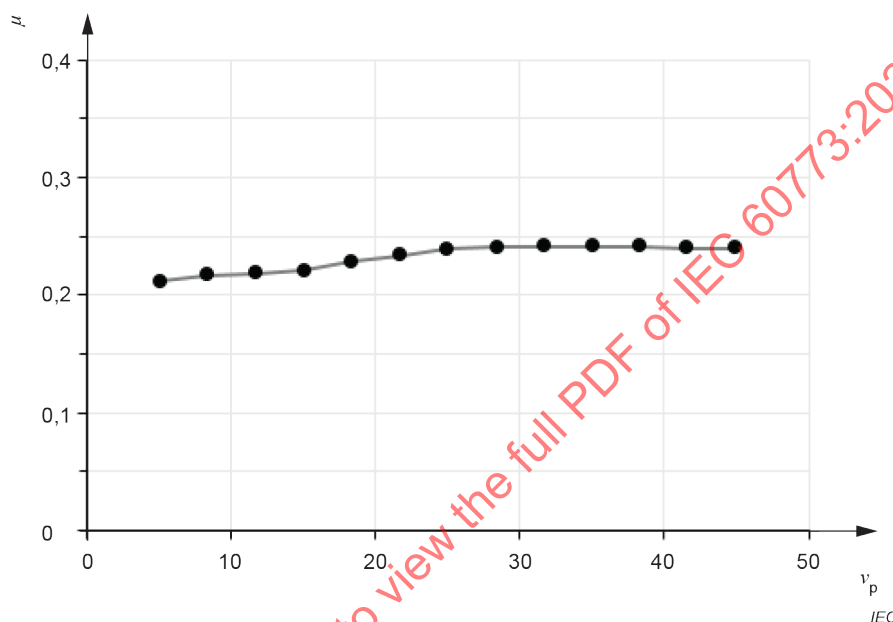
NOTE Lorsque p est exprimée en gf/cm² et t, a en cm, F_N est obtenue en grammes-force. Pour convertir en unité SI: une multiplication par $9,807 \times 10^{-3}$ donne F_N en newtons.

Par conséquent, le coefficient de frottement μ est calculé à l'aide de la formule (16) lorsque F_N et F_t sont exprimées dans les mêmes unités (grammes ou newtons):

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} = \frac{F_t}{N_B \times t \times a \times p} \quad (16)$$

6.5 Rapport

Le coefficient de frottement est consigné dans un tableau ou un graphique selon la Figure 18 avec les paramètres des conditions d'essai.



Légende

v_p Vitesse périphérique, en m/s

μ Coefficient de frottement

Figure 18 – Exemple de représentation graphique du coefficient de frottement μ en fonction de la vitesse périphérique v_p

NOTE Cette représentation graphique est un exemple pour une nuance de balai de type électrographitique.

7 Détermination de la chute de tension

7.1 Généralités

Les pertes électriques des balais peuvent être importantes pour les machines tournantes électriques, car elles peuvent provoquer une surchauffe des balais, des porte-balais et des collecteurs ou bagues. Le système de refroidissement de la machine doit être conçu sur la base des pertes totales, y compris les pertes électriques des balais.

Les pertes électriques des balais peuvent être déterminées par la chute de tension totale des balais installés sur la machine et par le courant.

La chute de tension totale U_B de la cosse du balai à la bague ou au collecteur est un paramètre complexe qui correspond à la somme des chutes de tension indiquées à la Figure 3:

$$U_B = U_c + U_i + U_f + U_s \quad (17)$$