MP BOARD + NCERT | कक्षा 12 भौतिक विज्ञान

अध्याय - 3 : विद्युत धारा (Current Electricity) — 100% बोर्ड परीक्षा स्पेशल हस्तलिखित नोट्स

[विशेषताएँ: नीली व लाल स्याही शैली | संपूर्ण सैद्धांतिक व्युत्पत्ति | प्रश्न 1 से 30 हल सहित | आंकिक प्रश्न | PYQs 2018-2025]

1. अध्याय का संक्षिप्त परिचय (Chapter Introduction)

आवेश की गति की अवस्था का अध्ययन **गतिमय विद्युत (Current Electricity)** कहलाता है। स्थिर विद्युत में आवेश विराम अवस्था में रहते हैं, परंतु जब किसी चालक के सिरों पर विभवांतर स्थापित किया जाता है, तो मुक्त इलेक्ट्रॉन निश्चित दिशा में गति करने लगते हैं, जिससे **विद्युत धारा** का प्रवाह होता है। यह अध्याय बोर्ड परीक्षा की दृष्टि से अत्यंत महत्वपूर्ण है क्योंकि इसमें से **7 से 8 अंक** के प्रश्न प्रतिवर्ष पूछे जाते हैं।

2. सभी महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Key Definitions)

1. **विद्युत धारा (Electric Current):** किसी चालक के किसी अनुप्रस्थ काट से प्रति एकांक समय में प्रवाहित होने वाले आवेश की मात्रा को विद्युत धारा कहते हैं। यह एक **अदिश राशि** है। इसका SI मात्रक **एम्पीयर (A)** है।
2. **धारा घनत्व (Current Density, J):** चालक के भीतर किसी बिंदु पर प्रति एकांक अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल से अभिलंबवत गुजरने वाली विद्युत धारा को धारा घनत्व कहते हैं। यह एक **सदिश राशि** है। मात्रक: A/m^2।
3. **अनुगमन वेग / अपवाह वेग (Drift Velocity, v_d):** बाह्य विद्युत क्षेत्र के प्रभाव में चालक के भीतर मुक्त इलेक्ट्रॉनों द्वारा प्राप्त किया गया औसत सूक्ष्म वेग अनुगमन वेग कहलाता है। इसका मान लगभग 10^{-4} m/s होता है।
4. **गतिशीलता (Mobility, μ):** प्रति एकांक विद्युत क्षेत्र की तीव्रता पर आवेश वाहक द्वारा प्राप्त अनुगमन वेग को गतिशीलता कहते हैं। ($\mu = v_d / E$)।
5. **ओम का नियम (Ohm's Law):** यदि किसी चालक की भौतिक अवस्थाएँ (जैसे ताप, लंबाई, दाब आदि) अपरिवर्तित रहें, तो चालक के सिरों पर लगाया गया विभवांतर उसमें प्रवाहित धारा के समानुपाती होता है ($V \propto I$ अर्थात् $V = IR$)।
6. **विशिष्ट प्रतिरोध / प्रतिरोधकता (Resistivity, ρ):** इकाई लंबाई और इकाई अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल वाले चालक के प्रतिरोध को उस पदार्थ की प्रतिरोधकता कहते हैं। इसका SI मात्रक **ओम-मीटर (Ω·m)** है।
7. **विद्युत चालकता (Electrical Conductivity, σ):** प्रतिरोधकता के व्युत्क्रम को चालकता कहते हैं ($\sigma = 1 / \rho$)। मात्रक: $\Omega^{-1}m^{-1}$ या S/m (सीमेंस/मीटर)।
8. **विद्युत वाहक बल (EMF, E):** एकांक धनावेश को पूरे परिपथ में (सेल के अंदर सहित) प्रवाहित करने में सेल द्वारा दी गई कुल ऊर्जा को सेल का विद्युत वाहक बल कहते हैं। मात्रक: **वोल्ट (V)**।
9. **टर्मिनल विभवांतर (Terminal Voltage, V):** एकांक धनावेश को परिपथ के किन्हीं दो बिंदुओं के बीच प्रवाहित करने में किया गया कार्य टर्मिनल विभवांतर कहलाता है।
10. **सेल का आंतरिक प्रतिरोध (Internal Resistance, r):** सेल के अंदर विद्युत अपघट्य द्वारा विद्युत धारा के प्रवाह में उत्पन्न रुकावट को सेल का आंतरिक प्रतिरोध कहते हैं।

3. अध्याय के सभी सूत्र (Master Formula Box)

⚡ धारा, अनुगमन वेग एवं ओम का नियम

भौतिक राशि	सूत्र (Formula)	संकेत व मात्रक
विद्युत धारा	$I = Q / t = n e / t$	Q = आवेश, n = इलेक्ट्रॉनों की संख्या (Ampere)
धारा घनत्व	$J = I / A = n e v_d$	A = क्षेत्रफल (A/m^2)
अनुगमन वेग	$v_d = (e E / m) \tau = (e V / m l) \tau$	τ = विश्रांति काल, E = विद्युत क्षेत्र
ओम का नियम / प्रतिरोध	$V = I R$ | $R = \rho (l / A)$	R = प्रतिरोध (Ohm, Ω)
प्रतिरोधकता (सूक्ष्म रूप)	$\rho = m / (n e^2 \tau)$	m = इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान, n = संख्या घनत्व
ताप पर निर्भरता	$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$	α = प्रतिरोध ताप गुणांक ($°C^{-1}$)

🔋 सेल, परिपथ एवं मापन यंत्र

अवधारणा / यंत्र	मुख्य सूत्र	विवरण
सेल समीकरण	$E = V + I r \Rightarrow I = E / (R + r)$	r = आंतरिक प्रतिरोध, R = बाह्य प्रतिरोध
आंतरिक प्रतिरोध	$r = R (E / V - 1) = R (l_1 / l_2 - 1)$	l_1, l_2 = विभवमापी की संतुलन लंबाइयाँ
प्रतिरोधों का संयोजन	श्रेणी: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$ समांतर: $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$	श्रेणी में धारा समान, समांतर में विभवांतर समान रहता है।
व्हीटस्टोन सेतु संतुलन	$P / Q = R / S$	धारामापी में धारा $I_G = 0$
मीटर सेतु (अज्ञात प्रतिरोध)	$S = R (100 - l) / l$	l = संतुलन लंबाई (cm में)
विभव प्रवणता	$K = V / L = (I R_{AB}) / L$	प्रति एकांक लंबाई विभव पतन (V/m)
विद्युत शक्ति व ऊष्मा	$P = VI = I^2R = V^2 / R$ $H = I^2 R t$ (जूल नियम)	शक्ति का मात्रक: वाट (Watt, W)

4. मुख्य सैद्धांतिक व्युत्पत्ति एवं हस्तलिखित आरेख (Derivations & Diagrams)

(A) अनुगमन वेग एवं विद्युत धारा में संबंध (Relation between I and v_d)

माना किसी चालक की लंबाई l तथा अनुप्रस्थ काट का क्षेत्रफल A है। चालक के प्रति एकांक आयतन में मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या n है।

- चालक का कुल आयतन = $A \times l$
- चालक में कुल मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या = $N = n A l$
- चालक में कुल आवेश = $Q = N e = n A l e$

जब चालक के सिरों पर विभवांतर V लगाया जाता है, तो इलेक्ट्रॉन v_d अनुगमन वेग से गति करते हैं। इलेक्ट्रॉनों को चालक पार करने में लगा समय:

$$t = l / v_d$$

अतः प्रवाहित विद्युत धारा:

$$I = Q / t = (n A l e) / (l / v_d) = n e A v_d$$

चित्र 4.1: चालक के भीतर इलेक्ट्रॉनों का अनुगमन वेग (v_d)

(B) व्हीटस्टोन सेतु का सिद्धांत (Wheatstone Bridge Principle)

प्रो. व्हीटस्टोन ने चार प्रतिरोधों को एक चतुर्भुज की चार भुजाओं में जोड़कर अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने का एक परिपथ तैयार किया। जब चतुर्भुज के विकर्ण में लगे धारामापी (G) में कोई विक्षेप न हो, तो सेतु **संतुलित अवस्था** में कहलाता है।

संतुलन का प्रतिबंध: $P / Q = R / S$

चित्र 4.2: व्हीटस्टोन सेतु परिपथ का आरेख

5. बोर्ड परीक्षा अति महत्वपूर्ण प्रश्न एवं उत्तर (प्रश्न 1 से 30)

क. 2 अंक वाले अति लघु उत्तरीय प्रश्न (Questions 1 to 10)

प्रश्न 1: अनुगमन वेग (Drift Velocity) से आप क्या समझते हैं? इसका परिमाण कितना होता है? 2 अंक

उत्तर: चालक के सिरों पर विभवांतर लगाने पर उसमें उपस्थित मुक्त इलेक्ट्रॉन जिस नियत औसत सूक्ष्म वेग से उच्च विभव वाले सिरे की ओर गति करते हैं, उसे **अनुगमन वेग** (v_d) कहते हैं। धातुओं में इसका परिमाण लगभग 10^{-4} m/s होता है।

प्रश्न 2: धारा घनत्व किसे कहते हैं? यह सदिश राशि है या अदिश? इसका मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: चालक के अंदर किसी बिंदु पर प्रति एकांक अनुप्रस्थ काट के क्षेत्रफल से अभिलंबवत बहने वाली धारा को धारा घनत्व (J) कहते हैं। ($J = I / A$)। यह एक **सदिश राशि** है और इसका SI मात्रक **एम्पीयर/मीटर²** (A/m^2) है।

प्रश्न 3: ओमीय एवं अन-ओमीय प्रतिरोध में दो अंतर लिखिए। 2 अंक

उत्तर:

1. **ओमीय प्रतिरोध:** जो परिपथ ओम के नियम का पालन करते हैं (जैसे तांबे का तार)। इनका V-I ग्राफ एक सरल रेखा होता है।
2. **अन-ओमीय प्रतिरोध:** जो ओम के नियम का पालन नहीं करते (जैसे डायोड, ट्रांजिस्टर)। इनका V-I ग्राफ वक्राकार होता है।

प्रश्न 4: ताप बढ़ाने पर धातुओं एवं अर्धचालकों की प्रतिरोधकता पर क्या प्रभाव पड़ता है? 2 अंक

उत्तर:

• **धातुओं (Conductors):** ताप बढ़ाने पर विश्रांति काल (τ) घटता है, जिससे प्रतिरोधकता **बढ़ती है**।

• **अर्धचालकों (Semiconductors):** ताप बढ़ाने पर मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या (n) तेजी से बढ़ती है, जिससे प्रतिरोधकता **घटती है**।

प्रश्न 5: गतिशीलता (Mobility) किसे कहते हैं? इसका सूत्र एवं SI मात्रक लिखिए। 2 अंक

उत्तर: किसी आवेश वाहक के प्रति एकांक विद्युत क्षेत्र में अनुगमन वेग को उसकी गतिशीलता (μ) कहते हैं।

सूत्र: $\mu = v_d / E$ | मात्रक: $m^2 / (V \cdot s)$ या $m^2 V^{-1} s^{-1}$।

प्रश्न 6: किरचॉफ का प्रथम नियम (धारा नियम) किस संरक्षण नियम पर आधारित है? 2 अंक

उत्तर: किरचॉफ का प्रथम नियम (सुलभ बिंदु नियम / धारा नियम $\sum I = 0$) **आवेश संरक्षण के नियम (Law of Conservation of Charge)** पर आधारित है।

प्रश्न 7: किरचॉफ का द्वितीय नियम (पाश नियम) किस संरक्षण नियम पर आधारित है? 2 अंक

उत्तर: किरचॉफ का द्वितीय नियम (वोल्टता नियम $\sum IR = \sum E$) **ऊर्जा संरक्षण के नियम (Law of Conservation of Energy)** पर आधारित है।

प्रश्न 8: अतिचालकता (Superconductivity) किसे कहते हैं? 2 अंक

उत्तर: अति निम्न ताप पर (एक निश्चित क्रांतिक ताप पर) कुछ पदार्थों का विद्युत प्रतिरोध अचानक शून्य हो जाता है। इस परिघटना को **अतिचालकता** और ऐसे पदार्थ को अतिचालक कहते हैं (जैसे पारा 4.2 K पर)।

प्रश्न 9: विभवमापी वोल्टमीटर से श्रेष्ठ क्यों है? (अत्यंत महत्वपूर्ण) 2 अंक

उत्तर: विभवमापी शून्य विक्षेप की स्थिति पर कार्य करता है, इसलिए यह मापन के दौरान परिपथ से कोई धारा नहीं लेता और सही विद्युत वाहक बल मापता है। जबकि वोल्टमीटर मापने के लिए परिपथ से कुछ धारा अवश्य लेता है।

प्रश्न 10: तांबे के तार को खींचकर उसकी लंबाई दोगुनी करने पर उसके प्रतिरोध पर क्या प्रभाव पड़ेगा? 2 अंक

उत्तर: जब तार को खींचा जाता है, तो आयतन स्थिर रहता है। प्रतिरोध $R \propto l^2$ होता है। लंबाई दोगुनी ($2l$) करने पर नया प्रतिरोध प्रारंभिक प्रतिरोध का **4 गुना ($4R$)** हो जाएगा।

ख. 3 अंक वाले लघु उत्तरीय प्रश्न (Questions 11 to 18)

प्रश्न 11: अनुगमन वेग (v_d) तथा धारा घनत्व (J) में संबंध स्थापित कीजिए। 3 अंक

उत्तर: माना किसी चालक का अनुप्रस्थ क्षेत्रफल A है और इसमें प्रवाहित धारा I है।
हम जानते हैं कि धारा एवं अनुगमन वेग में संबंध:

$$I = n e A v_d$$

धारा घनत्व की परिभाषा से: $J = I / A$
समीकरण में I का मान रखने पर:

$$J = (n e A v_d) / A = n e v_d$$

यही धारा घनत्व एवं अनुगमन वेग में अभीष्ट संबंध है।

प्रश्न 12: सेल के विद्युत वाहक बल (EMF) तथा टर्मिनल विभवांतर में तीन मुख्य अंतर लिखिए। 3 अंक

उत्तर:

क्र.	विद्युत वाहक बल (EMF)	टर्मिनल विभवांतर (V)
1	खुले परिपथ में सेल के दोनों ध्रुवों का विभवांतर।	बंद परिपथ में परिपथ के दो बिंदुओं के बीच का विभवांतर।
2	यह परिपथ के प्रतिरोध पर निर्भर नहीं करता।	यह परिपथ के बाह्य प्रतिरोध पर निर्भर करता है।
3	इसका मान सदैव टर्मिनल विभवांतर से अधिक होता है (डिस्चार्जिंग में)।	इसका मान EMF से कम होता है।

प्रश्न 13: सेल के आंतरिक प्रतिरोध से आप क्या समझते हैं? यह किन-किन कारकों पर निर्भर करता है? 3 अंक

उत्तर: सेल के अंदर घोल (विद्युत अपघट्य) द्वारा धारा के प्रवाह में उत्पन्न रुकावट को सेल का **आंतरिक प्रतिरोध (r)** कहते हैं।
निर्भरता:
1. **प्लेटों की दूरी (d):** दूरी बढ़ाने पर r बढ़ता है ($r \propto d$)।
2. **डूबे क्षेत्रफल (A):** क्षेत्रफल बढ़ाने पर r घटता है ($r \propto 1/A$)।
3. **विद्युत अपघट्य की सांद्रता (c):** सांद्रता बढ़ाने पर r बढ़ता है।
4. **तापमान (T):** ताप बढ़ाने पर आंतरिक प्रतिरोध घटता है।

प्रश्न 14: प्रतिरोधकों के समांतर क्रम (Parallel) संयोजन के लिए तुल्य प्रतिरोध का सूत्र व्युत्पन्न कीजिए। 3 अंक

उत्तर: मान लीजिए तीन प्रतिरोध R_1, R_2, R_3 समांतर क्रम में विभवांतर V के साथ जुड़े हैं। मुख्य धारा I तीन शाखाओं में विभाजित होती है: $I = I_1 + I_2 + I_3$।
ओम के नियम से: $I_1 = V/R_1$, $I_2 = V/R_2$, $I_3 = V/R_3$.
कुल धारा: $I = V (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$.
यदि तुल्य प्रतिरोध R_{eq} हो, तो $I = V / R_{eq}$.
तुलना करने पर:

$$1 / R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

प्रश्न 15: मीटर सेतु (Meter Bridge) किस सिद्धांत पर कार्य करता है? परिपथ चित्र बनाइए। 3 अंक

उत्तर: मीटर सेतु **व्हीटस्टोन सेतु के सिद्धांत** ($P/Q = R/S$) पर आधारित एक व्यावहारिक उपकरण है। इसका उपयोग चालक का अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने में किया जाता है। इसमें 1 मीटर लंबा मैंगनीन या कांस्टेंटन का तार लगा होता है।

सूत्र: $S = R (100 - l) / l$ (जहाँ l संतुलन लंबाई है)।

प्रश्न 16: विभव प्रवणता (Potential Gradient) किसे कहते हैं? इसका सूत्र एवं SI मात्रक लिखिए। 3 अंक

उत्तर: विभवमापी के तार की प्रति एकांक लंबाई में होने वाले विभव पतन (पतन की दर) को **विभव प्रवणता** (K) कहते हैं।

सूत्र: $K = V / L$ (जहाँ V = तार के सिरों पर विभवांतर, L = तार की कुल लंबाई)।

SI मात्रक: **वोल्ट/मीटर (V/m)** या वोल्ट/सेमी (V/cm)।

प्रश्न 17: पेल्टियर प्रभाव एवं सीबेक प्रभाव में अंतर स्पष्ट कीजिए। 3 अंक

उत्तर: सीबेक प्रभाव में दो भिन्न धातुओं की संधियों पर तापांतर उत्पन्न करने से विद्युत धारा प्रवाहित होती है (तापीय ऊर्जा → विद्युत ऊर्जा)। जबकि पेल्टियर प्रभाव में संधि से धारा प्रवाहित करने पर संधि पर ऊष्मा का अवशोषण या उत्सर्जन होता है (सीबेक प्रभाव का उत्क्रम)।

प्रश्न 18: कार्बन प्रतिरोधक के वर्ण कोड (Color Code) से प्रतिरोध ज्ञात करने की विधि संक्षेप में समझाइए। 3 अंक

उत्तर: कार्बन प्रतिरोधक पर 4 रंगीन पट्टियाँ (A, B, C, D) होती हैं।

- पहली दो पट्टियाँ (A, B): सार्थक अंक (First two digits)
- तीसरी पट्टी (C): 10 की घात (Multiplier 10^C)
- चौथी पट्टी (D): सहनशीलता / शुद्धता सीमा (Tolerance - Sona: ±5%, Chandi: ±10%, No color: ±20%)

ट्रिक: **B B ROY Great Britain Very Good Wife** (0 से 9 तक कोड)।

ग. 4 अंक वाले दीर्घ उत्तरीय प्रश्न (Questions 19 to 24)

प्रश्न 19: अनुगमन वेग की अवधारणा के आधार पर ओम के नियम का व्युत्पत्ति कीजिए। 4 अंक

उत्तर: माना लंबाई l तथा अनुप्रस्थ क्षेत्रफल A के चालक पर विभवांतर V लगाया गया है।

चालक में विद्युत क्षेत्र: $E = V / l$.

प्रत्येक इलेक्ट्रॉन पर बल: $F = e E = e V / l$.

इलेक्ट्रॉन का त्वरण: $a = F / m = (e V) / (m l)$.

अनुगमन वेग: $v_d = a \tau = (e V \tau) / (m l)$ (जहाँ τ विश्रांति काल है)।

धारा तथा अनुगमन वेग में संबंध से: $I = n e A v_d$.

v_d का मान रखने पर:

$$I = n e A [(e V \tau) / (m l)] = [(n e^2 A \tau) / (m l)] V$$

अतः:

$$V / I = (m l) / (n e^2 A \tau) = R \text{ (नियतांक)}$$

नियत ताप पर m, l, n, e, A, τ सभी नियत रहते हैं। अतः $V / I = R$ (ओम का नियम सिद्ध हुआ)।

प्रश्न 20: किरचॉफ के दोनों नियमों को चित्र बनाकर स्पष्ट समझाइए। 4 अंक

उत्तर:

1. प्रथम नियम (धारा नियम / संधि नियम): किसी विद्युत परिपथ में किसी भी संधि पर मिलने वाली समस्त धाराओं का बीजगणितीय योग शून्य होता है।

$$\sum I = 0$$

(संधि की ओर आने वाली धाराएँ धनात्मक तथा दूर जाने वाली ऋणात्मक मानी जाती हैं: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$)।

2. द्वितीय नियम (पाश नियम / वोल्टता नियम): किसी बंद परिपथ (लूप) के विभिन्न भागों में प्रवाहित धाराओं और उनके संगत प्रतिरोधों के गुणनफलों का बीजगणितीय योग उस पाश में लगे कुल विद्युत वाहक बलों के योग के बराबर होता है।

$$\sum I R = \sum E$$

प्रश्न 21: सेलों के श्रेणीक्रम संयोजन के लिए कुल धारा का व्यंजक प्राप्त कीजिए। यह संयोजन कब लाभदायक है? 4 अंक

उत्तर: माना n समान सेल (प्रत्येक का EMF = E, आंतरिक प्रतिरोध = r) श्रेणीक्रम में बाह्य प्रतिरोध R से जुड़े हैं।

- कुल विद्युत वाहक बल = $n E$
- कुल आंतरिक प्रतिरोध = $n r$
- परिपथ का कुल प्रतिरोध = $R + n r$

अतः परिपथ में प्रवाहित कुल धारा:

$$I = (n E) / (R + n r)$$

उपयोगिता / लाभ: यदि बाह्य प्रतिरोध आंतरिक प्रतिरोध की तुलना में बहुत अधिक हो ($R >> n r$), तो $I \approx n (E/R)$, अर्थात् एक सेल से प्राप्त धारा की n गुनी धारा प्राप्त होती है। अतः श्रेणीक्रम तब लाभदायक है जब **बाह्य प्रतिरोध बहुत अधिक हो**।

प्रश्न 22: सेलों के समांतर क्रम संयोजन के लिए कुल धारा का व्यंजक निकालिए। यह कब लाभदायक है? 4 अंक

उत्तर: माना m समान सेल समांतर क्रम में जुड़े हैं।

- कुल विद्युत वाहक बल = E (समांतर में EMF समान रहता है)
- कुल आंतरिक प्रतिरोध = r / m
- परिपथ का कुल प्रतिरोध = $R + (r / m) = (m R + r) / m$

अतः प्रवाहित कुल धारा:

$$I = (m E) / (m R + r)$$

लाभ: यदि आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($r >> m R$), तो $I \approx m (E/r)$। अतः समांतर क्रम तब लाभदायक है जब **सेल का आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो**।

प्रश्न 23: विभवमापी की सुग्राहिता (Sensitivity) से क्या तात्पर्य है? इसे कैसे बढ़ाया जा सकता है? 4 अंक

उत्तर: विभवमापी की वह क्षमता जिससे वह अत्यंत सूक्ष्म विभवांतर को भी यथार्थता से माप सके, उसकी **सुग्राहिता** कहलाती है। सुग्राहिता विभव प्रवणता (K) के व्युत्क्रमानुपाती होती है ($Sensitivity \propto 1 / K$)।

सुग्राहिता बढ़ाने के उपाय:

1. विभवमापी के तार की लंबाई (L) बढ़ाकर (लंबाई बढ़ाने से $K = V/L$ घटता है)।
2. प्राथमिक परिपथ में धारा का मान घटाकर (धारा नियंत्रक द्वारा)।

प्रश्न 24: विद्युत शक्ति (Electric Power) तथा विद्युत ऊर्जा को समझाइए। इनके मात्रक एवं संबंध लिखिए। 4 अंक

उत्तर:

• **विद्युत शक्ति (P):** किसी परिपथ में विद्युत ऊर्जा के व्यय होने की दर को विद्युत शक्ति कहते हैं। ($P = W / t = V I = I^2 R = V^2 / R$)। SI मात्रक: **वाट (Watt, W)**।

• **विद्युत ऊर्जा (E):** कार्य करने की कुल क्षमता। ($E = P \times t$)। व्यावसायिक मात्रक: **किलोवाट-घंटा (kWh) या यूनिट**।

• **संबंध:** $1\ kWh = 1000\ W \times 3600\ s = 3.6 \times 10^6\ J$ **(जूल)**.

घ. 5 अंक वाले विस्तृत निबंधात्मक प्रश्न (Questions 25 to 30)

प्रश्न 25: किरचॉफ के नियमों की सहायता से व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन का प्रतिबंध $P/Q = R/S$ स्थापित कीजिए। 5 अंक

उत्तर: चित्र 4.2 के अनुसार व्हीटस्टोन सेतु में चार प्रतिरोध P, Q, R, S जुड़े हैं। संतुलन की स्थिति में धारामापी शाखा BD में कोई धारा नहीं बहती ($I_G = 0$)।

अतः बिंदु B पर: $I_1 = I_2$ तथा बिंदु D पर: $I_3 = I_4$.

• **बंद पाश ABDA में किरचॉफ के द्वितीय नियम से:**

$$I_1 P - I_3 R = 0 \Rightarrow I_1 P = I_3 R \quad ---(1)$$

• **बंद पाश BCDB में किरचॉफ के द्वितीय नियम से:**

$$I_2 Q - I_4 S = 0 \Rightarrow I_2 Q = I_4 S \quad ---(2)$$

चूँकि $I_1 = I_2$ तथा $I_3 = I_4$, अतः समीकरण (2) को लिखा जा सकता है: $I_1 Q = I_3 S$.

समीकरण (1) में समीकरण (2) का भाग देने पर:

$$(I_1 P) / (I_1 Q) = (I_3 R) / (I_3 S) \Rightarrow P / Q = R / S$$

इति सिद्धम्। यह व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन का अभीष्ट नियम है।

प्रश्न 26: विभवमापी की सहायता से दो सेलों के विद्युत वाहक बलों (E_1 व E_2) की तुलना करने के प्रयोग का वर्णन निम्नलिखित शीर्षकों के अंतर्गत कीजिए: (i) परिपथ का रेखाचित्र, (ii) सिद्धांत एवं सूत्र, (iii) दो सावधानियाँ। 5 अंक

उत्तर:

(i) सिद्धांत एवं सूत्र व्युत्पत्ति: माना विभवमापी के तार की विभव प्रवणता K है।

• प्रथम सेल E_1 को परिपथ में जोड़ने पर यदि संतुलन लंबाई l_1 प्राप्त होती है, तो:

$$E_1 = K l_1 \quad ---(1)$$

• द्वितीय सेल E_2 को परिपथ में जोड़ने पर यदि संतुलन लंबाई l_2 प्राप्त होती है, तो:

$$E_2 = K l_2 \quad ---(2)$$

समीकरण (1) में (2) का भाग देने पर:

$$E_1 / E_2 = l_1 / l_2$$

(ii) सावधानियाँ:

1. संचायक सेल (मुख्य सेल) का EMF परीक्षण सेलों के EMF से अधिक होना चाहिए।
2. सभी सेलों के धन ध्रुव विभवमापी के एक ही सिरे (A) से जुड़े होने चाहिए।

प्रश्न 27: विभवमापी की सहायता से किसी सेल का आंतरिक प्रतिरोध (r) ज्ञात करने के प्रयोग का वर्णन सूत्र व्युत्पत्ति सहित कीजिए। 5 अंक

उत्तर:

• जब सेल खुले परिपथ में हो (कुंजी K_2 खुली हो), तो संतुलन लंबाई l_1 प्राप्त होती है। अतः सेल का EMF:

$$E = K\, l_1 \quad ---(1)$$

• जब प्रतिरोध बॉक्स से प्रतिरोध R निकालकर कुंजी K_2 बंद की जाती है, तो संतुलन लंबाई l_2 प्राप्त होती है। अतः टर्मिनल विभवांतर:

$$V = K\, l_2 \quad ---(2)$$

• हम जानते हैं कि सेल का आंतरिक प्रतिरोध: $r = R\,[\,(E / V) - 1\,]$.

समीकरण (1) तथा (2) से $E/V = l_1/l_2$ रखने पर:

$$r = R\,[\,(l_1 / l_2) - 1\,]$$

इस सूत्र की सहायता से आंतरिक प्रतिरोध r की गणना की जाती है।

प्रश्न 28: सेलों के मिश्रित क्रम (Mixed Grouping) संयोजन के लिए कुल धारा का सूत्र प्राप्त कीजिए तथा अधिकतम धारा प्राप्त करने की शर्त लिखिए। 5 अंक

उत्तर: माना n सेल श्रेणीक्रम में जुड़े हैं और ऐसी m पंक्तियाँ समांतर क्रम में जुड़ी हैं (कुल सेल = $N = m \times n$)। प्रत्येक सेल का EMF = E तथा आंतरिक प्रतिरोध = r है।

• प्रत्येक पंक्ति का EMF = $n\,E$ → कुल EMF = $n\,E$

• प्रत्येक पंक्ति का आंतरिक प्रतिरोध = $n\,r$ → कुल आंतरिक प्रतिरोध = $(n\,r) / m$

• कुल परिपथ प्रतिरोध = $R + (n\,r / m)$

अतः कुल धारा:

$$I = (n\,E) / [\,R + (n\,r / m)\,] = (m\,n\,E) / (m\,R + n\,r)$$

अधिकतम धारा की शर्त: धारा I का मान अधिकतम तब होगा जब हर $(m\,R + n\,r)$ न्यूनतम हो। गणितीय रूप से:

$$m\,R = n\,r \;\Rightarrow\; R = (n\,r) / m$$

अर्थात् **जब बाह्य प्रतिरोध सेलों के कुल आंतरिक प्रतिरोध के बराबर हो**, तब परिपथ में अधिकतम धारा प्राप्त होती है।

प्रश्न 29: मीटर सेतु द्वारा किसी तार का अज्ञात प्रतिरोध ज्ञात करने की प्रयोग विधि, सिद्धांत एवं सूत्र की स्थापना कीजिए। इसमें तांबे की मोटी पट्टियाँ क्यों लगाई जाती हैं? 5 अंक

उत्तर:

तांबे की मोटी पट्टियाँ लगाने का कारण: तांबे की पट्टियों का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल बहुत अधिक होता है, जिससे उनका प्रतिरोध नगण्य रहता है और मापन में अंत-त्रुटि (End Resistance Error) न्यूनतम हो जाती है।

सिद्धांत: 100 सेमी लंबे तार AC के संतुलन बिंदु B पर लंबाई $AB = l$ सेमी तथा $BC = (100 - l)$ सेमी हो, तो तार के भागों के प्रतिरोध $P = \sigma\, l$ तथा $Q = \sigma\,(100 - l)$ होंगे।

व्हीटستون नियम से: $P / Q = R / S \;\Rightarrow\; (\sigma\, l) / [\,\sigma\,(100 - l)\,] = R / S$.

अज्ञात प्रतिरोध S का सूत्र:

$$S = [\,R\,(100 - l)\,] / l$$

प्रश्न 30: विद्युत अपघट्य में धारा प्रवाह की प्रक्रिया को समझाइए। यह धात्विक चालकों में धारा प्रवाह से किस प्रकार भिन्न है? 5 अंक

उत्तर:

• **धात्विक चालक (Metallic Conductors):** धारा का प्रवाह केवल मुक्त इलेक्ट्रॉनों (Free Electrons) की गति के कारण होता है। इसमें कोई रासायनिक परिवर्तन नहीं होता और ताप बढ़ाने पर प्रतिरोध बढ़ता है।

• **विद्युत अपघट्य (Electrolytic Conduction):** धारा का प्रवाह धन आयनों (*Cations*) एवं ऋण आयनों (*Anions*) की विपरीत गतियों के कारण होता है। इसमें रासायनिक परिवर्तन (अपघटन) होता है तथा ताप बढ़ाने पर श्यानता घटने के कारण प्रतिरोध घटता है।

6. महत्वपूर्ण हल सहित आंकिक प्रश्न (Numerical Problems)

आंकिक प्रश्न 1: एक तांबे के तार का अनुप्रस्थ काट क्षेत्रफल $1 \times 10^{-7}\ m^2$ है। इसमें $1.5\ A$ की धारा बह रही है। यदि मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या घनत्व $9 \times 10^{28} / m^3$ हो, तो अनुगमन वेग की गणना कीजिए।

हल:

दिया है: $A = 1 \times 10^{-7}\ m^2$, $I = 1.5\ A$, $n = 9 \times 10^{28} / m^3$, $e = 1.6 \times 10^{-19}\ C$.

सूत्र: $I = n\,e\,A\,v_d \Rightarrow v_d = I / (n\,e\,A)$.

मान रखने पर:

$$v_d = 1.5 / (9 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-7})$$

$$v_d = 1.5 / (14.4 \times 10^{2}) = 1.5 / 1440 \approx 1.04 \times 10^{-3}\ m/s$$

उत्तर: अनुगमन वेग $v_d = 1.04 \times 10^{-3}\ m/s$ (या $1.04\ mm/s$)।

आंकिक प्रश्न 2: 10 V विद्युत वाहक बल और 3 Ω आंतरिक प्रतिरोध वाली बैटरी को एक प्रतिरोधक से जोड़ा गया है। यदि परिपथ में धारा 0.5 A हो, तो (i) बाह्य प्रतिरोधक का मान तथा (ii) बैटरी की टर्मिनल वोल्टता ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $E = 10\ V$, $r = 3\ \Omega$, $I = 0.5\ A$.

(i) सूत्र: $I = E / (R + r) \Rightarrow 0.5 = 10 / (R + 3)$

$$R + 3 = 10 / 0.5 = 20 \Rightarrow R = 20 - 3 = 17\ \Omega$$

(ii) टर्मिनल वोल्टता: $V = E - I\,r = 10 - (0.5 \times 3) = 10 - 1.5 = 8.5\ V$.

उत्तर: बाह्य प्रतिरोध = **17 Ω**, टर्मिनल विभवांतर = **8.5 V**.

आंकिक प्रश्न 3: एक मीटर सेतु में जब प्रतिरोध बॉक्स से 12 Ω का प्रतिरोध निकाला जाता है, तो संतुलन बिंदु 40 सेमी की दूरी पर प्राप्त होता है। अज्ञात प्रतिरोध का मान ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $R = 12\ \Omega$, $l = 40\ cm$, अतः $(100 - l) = 60\ cm$.

सूत्र: $S = [\,R\,(100 - l)\,] / l$.

मान रखने पर:

$$S = (12 \times 60) / 40 = 720 / 40 = 18\ \Omega$$

उत्तर: अज्ञात प्रतिरोध $S = 18\ \Omega$.

आंकिक प्रश्न 4: विभवमापी के प्रयोग में 1.25 V विद्युत वाहक बल वाले सेल के लिए संतुलन बिंदु 35.0 सेमी पर प्राप्त होता है। यदि इस सेल को किसी अन्य सेल से बदल दिया जाए, तो संतुलन बिंदु 63.0 सेमी पर स्थानांतरित हो जाता है। दूसरे सेल का EMF ज्ञात कीजिए।

हल:

दिया है: $E_1 = 1.25\ V$, $l_1 = 35.0\ cm$, $l_2 = 63.0\ cm$.

सूत्र: $E_1 / E_2 = l_1 / l_2 \Rightarrow E_2 = E_1 \times (l_2 / l_1)$.

मान रखने पर:

$$E_2 = 1.25 \times (63.0 / 35.0) = 1.25 \times 1.8 = 2.25\ V$$

उत्तर: दूसरे सेल का EMF = **2.25 V**.

7. महत्वपूर्ण तथ्य, ट्रिक्स एवं याद रखने योग्य बातें (Memory Tricks)

💡 **कार्बन प्रतिरोध वर्ण कोड ट्रिक (BB ROY Trick)**

"B B R O Y Great Britain Very Good Wife"

B = Black (0), B = Brown (1), R = Red (2), O = Orange (3), Y = Yellow (4), G = Green (5), B = Blue (6), V = Violet (7), G = Grey (8), W = White (9).

सहनशीलता (Tolerance): **Gold = ±5%, Silver = ±10%, No color = ±20%**.

⚡ **परीक्षा हेतु अत्यंत महत्वपूर्ण तथ्य (Key Facts for Objective Questions)**

- किसी चालक में धारा प्रवाहित करने पर उसमें इलेक्ट्रॉन का औसत वेग अनुगमन वेग (v_d) कहलाता है, जबकि उष्मीय वेग शून्य होता है।
- मिश्र धातुओं (जैसे नाइक्रोम, मैंगनीन, कांस्टेंटन) का प्रतिरोध ताप गुणांक (α) बहुत कम होता है, इसलिए इनका उपयोग मानक प्रतिरोध बनाने में किया जाता है।
- एक आदर्श एमीटर का प्रतिरोध **शून्य (0)** होना चाहिए।
- एक आदर्श वोल्टमीटर का प्रतिरोध **अनंत (∞)** होना चाहिए।
- एक आदर्श विभवमापी का प्रतिरोध **अनंत (∞)** होता है।
- सेल को चार्ज करते समय टर्मिनल वोल्टता विद्युत वाहक बल से अधिक होती है ($V = E + I r$)।

8. त्वरित पुनरीक्षण सारणी (Quick Revision Summary Table)

टॉपिक	मुख्य सूत्र	महत्वपूर्ण बिंदु / टिप्पणी
धारा घनत्व (J)	$J = n e v_d$	सदिश राशि, दिशा धारा की दिशा में।
प्रतिरोधकता (ρ)	$\rho = R A / l$	केवल पदार्थ एवं ताप पर निर्भर, लंबाई/क्षेत्रफल पर नहीं।
किरचॉफ का 1st नियम	$\sum I = 0$	आवेश संरक्षण का नियम।
किरचॉफ का 2nd नियम	$\sum IR = \sum E$	ऊर्जा संरक्षण का नियम।
व्हीटस्टोन सेतु	$P/Q = R/S$	शून्य विक्षेप विधि, सर्वाधिक सुग्राही जब P=Q=R=S.
विभवमापी	$E \propto l \Rightarrow E = K l$	शून्य धारा स्थिति, आदर्श वोल्टमीटर की तरह कार्य।

9. विगत वर्षों के बोर्ड प्रश्न (MP Board PYQs 2018 - 2025)

PYQ 1: विभवमापी वोल्टमीटर से किस प्रकार श्रेष्ठ है? समझाइए। 2024 / 2020

उत्तर: विभवमापी मापन के समय परिपथ से कोई धारा नहीं खींचता है (शून्य विक्षेप स्थिति), अतः यह सेल का वास्तविक व यथार्थ विद्युत वाहक बल मापता है। जबकि वोल्टमीटर स्वयं कार्य करने के लिए परिपथ से धारा लेता है, जिससे टर्मिनल विभवांतर प्राप्त होता है जो वास्तविक EMF से कम होता है।

PYQ 2: अनुगमन वेग की परिभाषा दीजिए तथा धारा घनत्व के साथ इसका संबंध स्थापित कीजिए। 2023 / 2019

उत्तर: परिभाषा हेतु उत्तर देखें प्रश्न 1। धारा घनत्व एवं अनुगमन वेग में संबंध: $J = n e v_d$ (पूर्ण व्युत्पत्ति हेतु प्रश्न 11 देखें)।

PYQ 3: किरचॉफ के नियमों को लिखिए तथा इनके आधार पर व्हीटस्टोन सेतु के संतुलन की शर्त स्थापित कीजिए। 2022 / 2018

उत्तर: किरचॉफ के नियमों हेतु प्रश्न 20 तथा व्हीटस्टोन सेतु की शर्त $P/Q = R/S$ के पूर्ण निगमन हेतु प्रश्न 25 का उत्तर देखें।

PYQ 4: सेलों के श्रेणीक्रम एवं समांतर क्रम संयोजनों की तुलना कीजिए। कौन-सा संयोजन कब उपयुक्त है? 2025 Special

उत्तर: श्रेणीक्रम तब उपयुक्त है जब बाह्य प्रतिरोध आंतरिक प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($R >> n r$)। समांतर क्रम तब उपयुक्त है जब सेल का आंतरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से बहुत अधिक हो ($r >> m R$)। (विस्तार हेतु प्रश्न 21 एवं 22 देखें)।