

עוד על הכח בתנועה המעגלית

מאת: נתן אריה - ביה"ס התיכון "כל ישראל חברים" - ת"א
ביה"ס להנדסאים, חטיבה תיכונית - ת"א

חברנו רלו שוורץ הציע ניסוי במטוטלת קונית לחקירת הכח בתנועה המעגלית (תהודה, כרך 12, מס' 2), תוך הבעת הסתייגויות מן הניסוי הידני והמקובל של PSSC. אני מצטרף, בכל לב, להסתייגויות אלה. על ניסוי המוצע לתלמידים להיות אמין ונשלט היטב, כך שביצעו ותוצאותיו לא יגרמו לתסכולים.

חקירת הכח בתנועה מעגלית ניוזנת לביצוע בדרכים שונות, בעזרת ציוד מצוי ותוך קבלת תוצאות אמינות, מדויקות למדי. למחפשים ניסוי קל לביצוע ולהסבר אני מציע את הניסוי הבא, שגיליתי אותו לפני שנתיים, במקרה, תוך חיפוש ניסויים מקוריים בשימור חנע זוויתית: חקר הכח בתנועה המעגלית, על-ידי מציאת "המהירות הקריטית", בעזרת גלגל אופניים ומשקולת.

במערכות טכנולוגיות ובניסויי מעבדה נוצר הכח הצנטריפטלי באמצעות מתחחות חוט או באמצעות כח המופעל, על ידי המסלול, מן החוץ כלפי המרכז. בתנועה מעגלית במהירות זוויתית קבועה - קבוע, כמובן, גם הכח.

בתנועה מעגלית זקופה (מישור הסיבוב אנכי, סביב ציר אופקי), מהווה משקלו של הגוף חלק משתנה מן הכח הצנטריפטלי, בהתאם לרכיב המשקל בכיוון הכח הצנטריפטלי. כשהגוף נמצא בנקודה העליונה של מסלולו מתלכדים כיווני המשקל והכח הצנטריפטלי, ומתחחות החוט (או, הכח החיצוני) מזערית. במקרה שמשקל הגוף גדול מן הכח הצנטריפטלי הדרוש כדי לקיים תנועה מעגלית - יפול הגוף ממסלולו המעגלי.

המהירות הקריטית היא המהירות המזערית הדרושה כדי שהכח הצנטריפטלי הנדרש לא יקטן ממשקל הגוף. מתקיימת, איפוא, הנוסחה:
 $mg = m\omega^2 R$, ולאחר הצמצום במסה: $g = \omega^2 R$.

להלן תאור הניסוי למציאת המהירות הקריטית:

הציוד הדרוש לביצוע הניסוי:

- * גלגל אופניים.
- * כן עץ עליו יותקן גלגל האופניים.
- * כליבת נגרים להידוק הכן לשולחן.
- * 3 מהדקים של תילים להולכת זרם חשמלי (צינוריות פליז קטנות ובהן שני ברגי הידוק בכל אחת. כל צינורית נמצאת בתוך גוף מבודד וכדי להוציאן יש להוציא את הברגים תחילה).



תרשים 1

הכנת המערכת לפעולה:

מרכיבים את הגלגל לכן ואת הכן לשולחן, כמו בניסויים של אנרגיה קינטית*. משחררים את אחת האומים המהדקת את אחד החישורים (שפיצים). משחררים את החישור ממקומו, על ידי כפיפה קלה, ומשחילים עליו את שלושת מהדקי חוטי החשמל. מחזירים את החישור למקומו ומהדקים את האום. את המהדק החיצוני מצמידים לחישוק

*ראו למשל, "חשמל ואנרגיה", עמוד 134, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, הוצאת "מעלות", 1977.

ומהדקים את הברגים על החישור. המהדק האמצעי חופשי לנוע לאורך המוט ויש להסיר את ברגיו ולשמרם. המהדק הפנימי יהודק אף הוא אל החישור, כך שהוא יאפשר תנועה חופשית של המהדק האמצעי, לאורך כ-ס"מ אחד (תרשים 1).

תאור הניסוי:

סיבוב הגלגל במהירויות נמוכות מאוד יגרום לנקישות קצובות של המהדק החופשי, אשר לנוע לאורך החישור, הלך ושוב, בהשפעת משקלו. סיבוב הגלגל במהירויות גבוהות יגרום, כמובן, ל"הדבקות" המהדק הנייד אל המהדק הקבוע החיצוני והסיבוב יהיה שקט לחלוטין.

מניעים את הגלגל במהירות מספקת כדי שהתנועה תהיה שקטה ומאזינים: מהירות הסיבוב פוחתת בהדרגה עד למצב שהכח הצנטריפטלי הדרוש להחזקת המהדק במקומו משתווה למשקלו. הפחתה קטנה, נוספת, של המהירות, תגרום להופעת נקישות, בשל נפילות קצרות של המהדק, במצבו האנכי העליון.

עם השמע הנקישות מודדים את מהירותו הזוויתית של הגלגל (מודדים את הזמן של 10 סבובים בעזרת שעון עצר ומחשבים. אין לשכוח לכפול ב- 2π !). מהירות זאת היא המהירות הקריטית, או, ליתר דיוק, קטנה במקצת ממנה. (שים לב, בעת המדידה: 10 סיבובים הם נקישת אפס + 10 נקישות! - מנסיוני נוכחתי שתלמידים עשויים להתבלבל בכך).

מודדים את רדיוס הסיבוב של המהדק (מדידה מדויקת דורשת מעט תושיה מן התלמידים).

ניתן עתה לשנות את רדיוס הסיבוב על ידי הזזת מיקום המהדקים הקבועים לאורך המוט. ביצוע סידרת ניסויים ברדיוסים שונים, לאורך התחום האפשרי ומדידת המהירויות הקריטיות, יביא למציאת הקשר בין רדיוס הסיבוב למהירות הקריטית (במסה קבועה).

שינויים במסת הגוף הנע על ידי החלפת המהדק הנייד או על ידי הצמדת מסה נוספת (סלמטריה, בקרוב) סביבו, לא יגרמו, כמובן, לשינויים במהירות הקריטית. עם זאת יש להדגיש, בפני התלמידים, את התלות, של יחס ישר, בין מסת הגוף לבין הכח הצנטריפטלי, תלות המתאזנת, בניסוי זה, על ידי התלות המקבילה בין המסה והמשקל.

בטבלה שלהלן מובאת סדרת תוצאות שנחקבלו, בעבודה רציפה, במסה אחידה:

מספר הניסוי	הרדיוס m ב r	זמן מחזור T ב s	מהירות זוויתית ω ב s^{-1}	$g=\omega^2 r$ ב m/s^2
1	0.27	1.061	5.922	9.47
2	0.27	1.065	5.900	9.40
3	0.27	1.067	5.889	9.36
4	0.22	0.973	6.458	9.17
5	0.22	0.977	6.431	9.10
6	0.22	0.961	6.538	9.40
7	0.16	0.824	7.625	9.30
8	0.16	0.827	7.598	9.24
9	0.16	0.816	7.700	9.49

הפזזור בין התוצאות הוא באחוזים ספורים בלבד. התוצאה הממוצעת שונה, כמובן, מן המחושבת, כי אנו מתחילים את מדידת הזמן לאחר שהופיעו הנקידות והגלגל ממשיך להאיט.