מבוא למכשור של ביו-פידבק

9/1/2008

בקרת עירור פסיכו פיזיולוגי: המוקד המרכזי של ביו-פידבק

יישום עיקרי של ביו-פידבק (וכנראה הגורם העיקרי להתפתחות התחום) הוא כמכשור לזיהוי ובקרה של עירור פסיכו פיזיולוגי. עם התפתחות תחומי הבריאות התברר שמצבי מתח תדירים, עודפים ומתמשכים, ועירור יתר גורמים או מחמירים בעיות בריאותיות רבות. העניין בזיהוי וטיפול במצבים אלה גבר, ובה בעת התפתחויות טכנולוגיות אפשרו לצפות בתהליכים פסיכולוגיים הקשורים לעירור יתר שהיו בלתי ניתנים לצפייה עד כה.

השילוב הטבעי בין התפתחויות טכנולוגיות ורפואיות אלו מצא ביטוי בתחום החדש של ביו-פידבק בו השפות והתפיסות של פסיכולוגיה, פיזיולוגיה ואלקטרוניקה משמשות בערבוביה. המונחים "לחץ" "הטרמה" (ציפייה), "עירור אוטונומי", ו"סיבי שריר" מצויים במשפטים המדברים על " אלקטרומיוגרפיה", "מיקרו-וולטים", "רוחב-פס", ו-"פילטרים". משפטים בני כלאיים כאלה נשמעים קצת מסתוריים לאלה מאתנו (כלומר רובנו) שאינם בקיאים בשפות אלו. מן הסתם התעלומה הגדולה ביותר בקרב קהל חסידי ומתלמדי הביו-פידבק היא שפת האלקטרוניקה. משלש השפות המשמשות את הביו-טכנולוגיה, זו הפחות דומה לשפה רגילה.

כוונת פרק זה היא לבאר מושגים טכניים עיקריים, שהם בעלי חשיבות מעשית בביו-פידבק, ולהטמיעם בשפה ברורה שתהיה נהירה לכל העוסקים בתחום. רעיונות טכניים מוצגים באמצעות אנאלוגיה או תיאורים לא פורמאליים (היוריסטיים), מתוך כוונה שיהפכו לחלק טבעי בלשון הביו-פידבק של הקורא. בנוסף מביא פרק זה שיפוט סובייקטיבי על החשיבות המעשית של תופעות בתחום הביו-פידבק, שיפוט המשקף במובהק את דעתו של מחבר הפרק בנושא. זו תופעה שכיחה במיוחד בתחומים בהם אין תפיסה מוגדרת, אמפירית או מעשית, המוסכמת על כל העוסקים בתחום.

פרק זה מוצע אם כן כמבוא. הוא מתמקד בפרקטיקה במקום העמקה ובפישוט והמחשה במקום פרוט טכני. הוא מוצג באופן לא פורמאלי, עם דגשים על עקרונות ועובדות גם יחד, ומכיל חוות דעת מעשית שאינה בהכרח אובייקטיבית.

קשרי גומלין של עירור : שלשה תהליכים פיזיולוגיים מעניינים בביו-פידבק

שלשת התהליכים הפיזיולוגיים המשויכים בדרך כלל עם עירור יתר הם מתח שרירים שלדיים, היצרות כלי הדם הפריפריאליים (פעילות השרירים החלקים), ופעילות חשמלית של העור. שלשה תהליכים אלה, ובמיוחד שני הראשונים, הם האופנים הנפוצים ביותר בשימוש בביו-פידבק. תופעה זו אינה מפתיעה כלל, שכן תהליכים אלה מוכרים זה מכבר כמעורבים ישירות בכעס, פחד, התרגשות, ועירור.

שיוך זה גם מוכר מביטויים ופתגמים מוכרים שמצאו את דרכם לשפת היום-יום. למשל המושג "דריכות" לקראת התקפה או התגוננות מעורר בדמיוננו חזות של אדם ששרירי משורגים ומוכנים לפעולה. אגרופיו "קפוצים" וסנטרו "הדוק". בקצרה – האדם "מתוח". אם אין סיבה מציאותית למצב זה או שהוא מצב רגיל אצל האדם , העצה השגרתית עבורו תהיה "הרגע", "השתחרר", או "הנח". הביטוי "דמי קפא" בשפה המדוברת מבוסס על הקשר בין תחושת פחד לידיים קרות, ובאופן מובהק יותר בביטוי הציורי – "ידיים קרות – לב חם". בשתי הדוגמאות טמונה ההכרה שידיים קרות הן סימן לתגובה רגשית. ביטויים אלה מבטאים את מה שנחשב כאמת ידועה לכל שהיצרות כלי הדם הפריפריאליים היא סימן מובהק לעירור. ובהתייחסות לפעילות החשמלית של העור ניתן להדגים פחד ע"י דימוי של "זעה קרה". לעומת זאת "No Sweat" הוא ביטוי המתאר שלווה וקלות.

דוגמאות אלו מראות שהקשר בין מתח שרירי, היצרות כלי הדם הפריפריאליים, והפעילות החשמלית של העור לעירור אינן בגדר חדשות. הלימוד השיטתי והאפיון של תהליכים אלו הינם חדשים יחסית ושייכים לתחום הביו-פידבק. מכשירי ביו-פידבק קיימים כדי לסייע ללימוד ובעיקר לאפיון תהליכים אלה.

ציוד של ביו-פידבק

מונחי יסוד

ניתן להתייחס לציוד של ביו-פידבק כ"מכשיר", "מכונה", "מתקן", "אביזר", "כלי", "התקן", ואפילו " "פטנט" , או "המצאה" . רב המונחים האלה משמשים בערבוביה וללא אחידות או עקביות. לעתים תכופות הבחירה הינה אקראית או נובעות מגחמה רגעית . זו לוא דווקא ביקורת שכן אנשים נוהגים להמציא הגדרות רבות לחפצים המעניינים אותם. ייתכן שהפתגם הסיני העתיק האומר ש"לילד אהוב יש שמות רבים" מסביר תופעה זו כפשוטה.

בכל מקרה, כדאי לדון בקצרה בקונוטציות של כמה מהמונחים הפופולאריים לציוד הביו-פידבק. "מכשיר" הינו כנראה הביטוי הרשמי ביותר מהם, והוא מסמל מתקן מדידה לצורך קביעת הערך הנוכחי של הכמות הנבחנת. ציוד רב של ביו-פידבק לא מוכל בהגדרה כזו, שכן הוא לא מודד שום דבר אלא רק מאפשר מעקב אחר שינויים ועוצמות יחסיות. "טבעות מצב רוח" למשל ו"פטנטים" פשוטים דומים להן אינן עונות על התנאים הנדרשים כדי להיחשב ככלי מדידה. המונחים "מתקן" , "ציוד" , "התקן" אינם מבהירים די הצורך אם הם אכן מבצעים מדידה כלשהי, ולכן משמשים כפשרה כללית בטוחה, למרות ש"התקן" רומז על רמת ביצועים של מטלה ספציפית במיוחד. המונח "מתקן" או "מערכת" הינו אפילו ניטראלי יותר, כי אינו מעיד על שום דבר מעבר לעובדה שהוא מתייחס לישות כלשהי. המונח "מכונה" מייצג מכניזם שמעביר כוח, פעולה, או אנרגיה באופן מוגדר מראש. מי שמורגלים באלקטרוניקה מדמיינים מכשור אלקטרוני המשדר (ולו רק באופן מופשט) כוחות, תנועה, או אנרגיה באמצעות המעגלים החשמליים שלהם, ולפיכך משתמשים על פי רוב במינוח "מכונה" כדי לתאר את ציוד הביו-פידבק.

בפרק זה נעשה שימוש ברוב המונחים הללו, וכמקובל בניסיון המעשי הם משמשים כאן לסירוגין. אין כאן כל כוונה מעבר לפירושים והקונוטציות המקובלים.

המשימות שמכשירי הביו- פידבק אמורים למלא

למכשיר ביו-פידבק ישנן שלוש משימות:

1. לעקוב (באופן כלשהו) אחר התהליך הפיזיולוגי הנבחר.
2. לאמוד (באופן נראה) את תוצאות המעקב.
3. להציג את תוצאות המעקב או המדידה כמידע שימושי.

הפסקאות הבאות דנות בקצרה איך ניתן להגיע לשלושה תהליכים חשובים בביו-פידבק.

אלקטרומיוגרפיה: תרשים חשמלי של כיווץ השריר

מכשיר ביו-פידבק אינו יכול "לחדור" לתוך השריר המתכווץ ולמדוד את הכיווץ ישירות. כאשר השריר מתכווץ, הוא מושך את שני קצוות העיגון שלו, וזו בעצם משמעות של "כיווץ שריר". לפיכך זו למעשה תופעה קינטית המשלבת כוח ולפעמים תנועה. באופן מעשי קשה לעקוב אחר תופעה זו. לא ניתן להחדיר מד-עומס מתיחה בין השריר לנקודת העיגון שלו ולמדוד את המתיחה בגרמים. (קיימים מכשירי מדידה ("goniometers" מד-זווית) המשמשים למעקב אחר כיווץ השריר ביישומי רפואה פיזית, אך הם אינם רגישים למיקום או רמת המתח הקשורה ברגיעה ורמת עירור נמוכה המשמשים בביו-פידבק.

מאחר וכיווץ השריר אינו נגיש למדידה בפני עצמו, נאלץ להסתפק במדידת פן אחר כלשהו של התופעה. ביו-פידבק עושה שימוש באספקט החשמלי של כיווץ השריר. כיווץ שריר נגרם פחות או יותר מכיווץ בו-זמני של המרבה סיבי שריר המרכיבים את השריר. סיבים אלה מופעלים על ידי אותות חשמליים הנישאים על ידי תאים הנקראים "motor units" , והשריר מתכווץ בהתאם לסך הפעילות החשמלית המשודרת לסיבי שריר אלה. פעילות חשמלית זו ניתנת לחישה על ידי חוט דק או אלקטרודות מחט החודרות את העור שמעל לשריר. שיטה נפוצה יותר היא שימוש באלקטרודות חיצוניות המונחות על משטח העור שמעל לשריר, באזור בו נוכחים אותות חשמליים מוחלשים מסיבי שריר תת עוריים. שיטה זו מועדפת לצורכי ביו-פידבק משום שהיא נוחה מעשית ומקבילה היטב לכיווץ הריאלי של השריר. יש לשים לב ששיטה חשמלית זו (המכונה אלקטרומיוגרפיה [EMG]) אינה עוקבת אחר כיווץ השריר עצמו, אלא אחר הפן החשמלי של כיווץ שריר שמתייחס פחות או יותר ישירות לכיווץ השריר עצמו.

הנקודה החשובה כאן היא זו: EMG היא השיטה המועדפת של מעקב אחר כיווץ שריר, אבל היא אינה מודדת ממש את כיווץ השריר. היא מודדת פעילות חשמלית מקבילה לכיווץ השריר. לפיכך מכשיר EMG אינו מספק "קריאה" של נתוני כוח או יחידות תנועה. במקומם הוא מספק קריאה במונחי מתח חשמלי. זאת משום שמדידתו היא של פעילות חשמלית ולא קינטית. פעילות חשמלית נמדדת במונחי וולט. מיקרו-וולט הינו חלק המיליון של וולט. קראית EMG במיקרו-וולטים שונה בהגדרתה מיחידת מדידה קינטית של כיווץ שריר כגון גרמים או מילימטרים. מצב זה מסביר את ההפתעה הראשונית שמאפיינת מתלמדים של ביו-פידבק הנוכחים שכווץ שרירם נמדד בוולטים, יחידה חשמלית שעל פניה אין לה ולא כלום עם כיווץ שרירים.

לסיכום, כיווץ שרירים מנוטר באמצעות שיטה חשמלית הנקראת EMG ואשר מודדת את האנרגיה החשמלית המשתחררת ע"י סיבי שריר בעת כיווצם. מכשיר EMG מספק קריאה במיקרו-וולטים - יחידת מתח חשמלי, אשר מתייחסת ישירות לכיווץ השריר.

טמפרטורה פריפריאלית: מדד של היצרות כלי דם פריפריאליים

מכשיר ביו-פידבק אינו יכול למדוד בפשטות את שינוי קוטר כלי הדם הפריפריאליים או את פעילות השרירים החלקים הגורמת לשינוים כאלה. לפיכך נדרש להשתמש בתכונה שקולה לשינוי קוטר כלי הדם. כלי דם מורחבים מזרימים יותר דם חם מכלי דם מוצרים. בשל כך נוטות רקמות העור באזורים אלה להתחמם ולהתקרר בהתאם לשינוי קוטר כלי הדם ההיקפיים, ויכולות להוות מדד טוב להיצרות כלי הדם. תופעה זו מודגשת במיוחד בקצוות בגוף כגון אצבעות הידיים ובהונות הרגליים, הרגישים במיוחד לשינויים בקוטר כלי הדם ואפילו שינויים קטנים מאד באספקת הדם לרקמות המועטות יחסית באזורים אלה מביאים להתחממות והתקררות מהירה שלהן בהתאמה.

גם כאן התהליך הפיזיולוגי הנדון (היצרות כלי הדם הפריפריאליים) אינו נגיש לנו, אבל תופעה שקולה נלווית (טמפרטורת העור הפריפריאלית) מהווה מדד שמיש עבורנו.

מכשירי ביו-פידבק מספקים אופיינית קריאה במעלות פרנהייט כמדידה הלא-ישירה של היצרות כלי דם פריפריאליים. יחידת מידה של טמפרטורה שונה מהותית מהיקף של כלי דם ובכך מודגשת העובדה שרק מדידה עקיפה של היצרות כלי דם הינה אפשרית בביו-פידבק.

מדידה פוטו-חשמלית של האצבע (Finger Phtototransmission): עוד מדד של היצרות CH

דרך נוספת למדידה עקיפה של היצרות כלי דם עושה שימוש בעובדה שאצבע או בוהן בהם זורם פחות דם מאפשרים חדירה גדולה יותר של אור דרכם, לעומת אצבעות בהן זורם דם רב יותר. במלים אחרות עור חיוור יעביר יותר אור מאשר עור סמוק. אור חלש מוקרן דרך בשר האצבע ומוחזר מהעצם לחיישן פוטו אלקטרי. שינויים בעוצמת האור בחיישן ובעקבותיהם שינויים בעוצמת האות החשמלי מעידים על שינויים בנפח הדם הזורם.

המכשיר נקרא פוטו-פלסמוגרף ("Photoplethysmograpsh") והוא משמש לפעמים בביו-פידבק. הוא עוקב אחר הדופק, ויכול, (בעזרת מעגלים חשמליים ייעודיים הממצעים את הדופק), לתת אינדיקציה על נפח יחסי של הדם, שהוא מדד נוסף להיצרות כלי דם פריפריאליים. מכשיר כאלה מסוגלים לספק רק מדדה יחסית. כלומר הם מצביעים על שינויים יחסיים אבל לא יכולים למדוד מידות מוחלטות של סקאלה תקנית כלשהי. השימוש בפוטו-פלסמוגרפיה לא נפוץ כמו שמדידת טמפרטורה פריפריאלית משמשת להערכת היצרות כלי דם פריפריאליים. במסגרת ספר זה לא נדרשת הרחבה נוספת של שיטה זו. לקוראים המעוניינים בכך מומלץ לפנות ל- (Jennings, Tahmoush, & Redmond, 1980) .

מוליכות חשמלית של העור: מדד לפעילות בלוטות זיעה

פעילות בלוטת הזיעה היא תופעה פיזיולוגית נוספת שלא ניתנת למדידה ישירה. קשה לדעת אם בלוטת הזיעה "פועלת", כמה זיעה מופרשת, או כמה בלוטות פעילות בזמן מסוים. למרות זאת הזיעה מכילה מלחים מוליכי חשמל המעניקים לעור מזיע מוליכות טובה יותר מאשר לעור יבש. לפיכך למוליכות חשמלית של העור (Skin Conductance Activity, או SCA) יש מתאם מצוין עם פעילות בלוטות זיעה. בצירוף לתכונות חשמליות נוספות של העור מכונה תופעה זו electrodermal activity (EDA) או בשמה ההיסטורי"Galvanic Skin Response (GSR) . מכשיר מוליכות עור מפעיל זרם במתח (וולטאג') נמוך מאד, בדרך כלל על פני משטח העור של אצבעות היד או הרגל בצדן הפנימי, (צד הכף המשופע בבלוטות זיעה), ומודד את כמות הזרם שהעור מאפשר להזרים דרכו. עצמת הזרם היא אינדיקציה לרמת הזעת העור והיא מבוטאת ביחידות מוליכות חשמלית מיקרו-אוהם (micro-ohms).

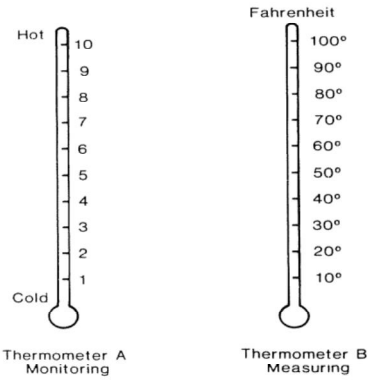
שוב נעשה שימוש ביחידה חשמלית (מוליכות) כמדידה עקיפה של תופעה פיזיולוגית (פעילות בלוטת זיעה). זו למעשה ההבהרה למה שנראה קצת מוזר מלכתחילה: פעילות בלוטות הזיעה נמדדת במונחים חשמליים שלכאורה אין להם ולא כלום עם פעילות זו.

החפצה (Objectification) ומדידה

כמו שהוזכר לעיל מעקב ישיר אחר כיווץ שרירים היצרות כלי דם פריפריאליים, ופעילות בלוטות הזיעה אינו מעשי. לפיכך עושים מכשירי הביו-פידבק שימוש בתופעות מקבילות מתאם גבוה ונגישות מעשית כדי לבצע מדידה בלתי ישירה של תהליכים פיזיולוגיים אלה.משתמע מכך שיש להשתמש במדידות המתקבלות כאינדיקציה נוחה לתהליכים פיזיולוגיים אך לא לפרש אותן כאילו היא התהליך עצמו. מטפלים חייבים להפריד בין התהליך הפיזיולוגי התת-עורי מהרעיון שבבסיס המכשירים המתיימרים לאמוד אותו ע"י מדידות חיצוניות. הפרדה זו חשובה לצורך הבנת המדידה, החפצה, המשגה, ופירוש נתוני ביו-פידבק.

יש טעם ליצור סקאלה אובייקטיבית כלשהי כדי שתתאפשר השוואה בין הוראת ביו-פידבק של אדם בפרקי זמן שונים או השוואה בין אנשים שונים. ראשית נבחין בהבדלים בין "מעקב" או "בקרה" לבין "מדידה". בקרה מתרחשת כשמתקבל אות נראה כלשהו, קריאת סרגל למשל, אשר מתייחס לתהליך ספציפי כלשהו (כגון טמפרטורת העור או כיווץ השריר), אך התופעה המנוטרת לא ניתנת לכימות תקני. מדידה לעומת זאת קורית כשמכשיר מכויל ומספק נתונים כמותיים תקניים המציגים את השינויים החלים בתהליך המבוקר.

לצורך המחשת ההבדל בין שני המושגים ניקח לדוגמא את שני מדי החום המוצגים בתרשים מס' 4.1 הזהים לחלוטין בתפקודם, אך נבדלים בסקאלות שלהם. למד החום A יש סקאלה המאפשרת למשתמש מעקב אחר שינויים ברמת החום הנובעים מאירועים אחרים שאינם נמדדים ישירות. כל משתמש יכול לפתח לעצמו נורמות של רמות חום או שינויים ברמות חום שיש להם משמעות עבור צרכי היישום שלו. מד החום A עקבי ביחס למדידות שלו עצמו, אבל אינו מתייחס לאף תקן טמפרטורה חיצוני. מדחום B לעומתו מכויל לפי תקן חיצוני של טמפרטורה – מעלות פרנהייט. הוא מודד טמפרטורה בהתאם למוסכמות (בהנחה שהכיול שלו אכן תואם לסקאלת פרנהייט).



תרשים 4.1 מדי חום לבקרה ומדידה

היתרון של מדידה על בקרה הוא כמובן שמשתמשים ממקומות שונים או יישומים שונים יכולים לערוך השוואות כמותיות ישירות של מושא בדיקתם. מכשיר הבקרה יכול לשמש אך ורק לצרכי השוואה איכותית של חום יחסי או שינויי חום. מדידה נוטה לשפר יכולות של שחזור תהליכים והשוואת תוצאות. ואולם מאחר ותחום הביו-פידבק עדיין חסר סקאלת מדידה תקנית מוגדרת היטב או מוסכמת בתפוצה רחבה, מדידה כמתואר לעיל אינה מעשית.

לדוגמא, מכשירי EMG מצוידים בדרך כלל במדים המציגים תוצאות במיקרו-וולטים. מאחר ועל שעוני התוצאות מופיעים מספרים הם יוצרים תחושה של אובייקטיביות ויכולת מדידה כזו המודגמת במד החום B הנ"ל. ואולם במציאות לא קיים תקן מקובל של מיקרו-וולט EMG . למעשה כל דגם או מותג של מכשיר EMG הופך לתקן הייחוס של עצמו. כתוצאה מכך מכשירים שונים מפיקים קריאות תוצאות שונות לאותו תהליך עצמו של כיווץ שריר. לפיכך, ניתן להשוות אך ורק תוצאות שהושגו ממדידה של אותו מכשיר (או מכשיר דומה מאד בעיצובו). הנושא יובהר יותר בהמשך בעת שנדון בעיצוב מכשיר ה EMG. הנקודה הראויה ביותר לציון כאן היא שתוצאות ה EMG צריכות לשמש רק כבקרה (כמו במקרה של מדחום A) ולא כמדידה (כמו במקרה של מדחום B). אותו כלל חל על פרשנות מדידות המוליכות החשמלית של העור. תוצאות של מדידת טמפרטורת העור לעומת זאת הן אכן מידות מוחלטות (כמו במקרה של מדחום B), בהנחה שמד החום מכויל כראוי לסקאלת טמפרטורה כגון מעלות פרנהייט.

פעולת מכשיר ה EMG

מכשיר ה EMG קולט אותות חשמליים חלשים הנוצרים בעת הפעל השריר. כל שריר מורכב מהרבה סיבי שריר המכילים "נוירונים מוטוריים" המאפשרים תקשורת חשמלית עם רמה גבוהה יותר של מערכת העצבים. כיווץ השריר נגרם כאשר הנוירונים המוטוריים מזרימים אותות הפעלה לסיבי השריר. חלק קטן מאנרגיה חשמלית זו "דולף" מהשריר וחודר לרקמות שמסביב. אנרגיה חלקית זו יכולה לשמש לבקרה על פני העור. תפקידי מכשיר הEMG הם כדלקמן:

1. לקלוט אנרגיה חשמלית נמוכה כפי שתואר לעיל ממשטח העור.
2. להפריד את אנרגיית ה EMG מאנרגיות אחרות (שאינן נובעות מהפעלת השריר) הקיימות על פני העור ומגבירות מאד את אנרגיית ה EMG.
3. לתרגם את האנרגיה המוגברת באמצעות ה EMG למידע שימושי או ביו-פידבק ולהציגו למשתמש.

קליטת אנרגיית EMG מן העור: אלקטרודות

אלקטרודות חיצוניות ("Surface electrodes"), בדרך כלל עשויות מדיסק מתכתי שטוח המותקן על גבי פלסטיק או גומי , מתחברות לעור באמצעות ג'ל או קרם מוליכי חשמל. חווט חשמלי משלים את המעגל הנוצר בין העור למכשיר ה EMG. יש אלקטרודות עדינות שניתן למקם אותן באופן מדויק כפי שנדרש למשל בבקרת שרירים

קטנים. אחרות מוצמדות לעור אחת לאחת על ידי סרט דביק או מדבקות דו-צדדיות. סוג אחר של אלקטרודות מצויד ברצועות חיבור או סרט-מצח לצורך הצמדה סימולטנית של שלשת האלקטרודות הנדרשות בדרך כלל לצורכי ביו-פידבק באמצעות EMG. יש סוגים של אלקטרודות המחוברות חיבור קבוע לחווט, בעוד שאחרים מאפשרים הצמדה וניתוק באמצעות לחצניות המאפשרות החלפת האלקטרודות ללא צורך בהחלפת החווט. היתרון של שימוש בסוג זה של אלקטרודות טמון ביכולת להחליף בקלות אלקטרודה או חוט החשודים כפגומים ללא צורך בהחלפה או חיבור מחדש של הסט במלואו. לשיפור הזה יש גם צד פחות רצוי – מערכות מסוג זה מסורבלות יותר ממערכות המבוססות על חיבורים קבועים.

אלקטרודות רבות מורכבות מחומרים פשוטים מאד כגון נחושת מצופת ניקל, או פלדת אל-חלד , בעוד שאחרות עשויות ממתכות יקרות כגון זהב, כסף מצופה בכסף כלורידי (silver/silver chloride) .האחרונות היו מועדפות היסטורית בשימושים של בקרה פיזיולוגית משום שמתכות אלה לא נוטות להגיב (כימית) עם העור או חומרים אחרים הבאים איתן במגע. ואולם האלקטרודות הפשוטות יותר הוכחו כמספקות לצורכי אפליקציות EMG של ביו-פידבק והן נפוצות מאד בשימוש כיום. שיפורים טכנולוגיים באלקטרוניקה הקטינו את הצורך בשימוש של אלקטרודות העשויות ממתכות יקרות לביו-פידבק באמצעות EMG. (כפי שיוסבר להלן, מגברי EMG מיוצרים כעת עם עכבת כניסה גבוהה וסף דחיית רעשים גבוה המפצים על איכות האלקטרודות הנמוכה יותר והכנת משטח העור באופן פחות יסודי).

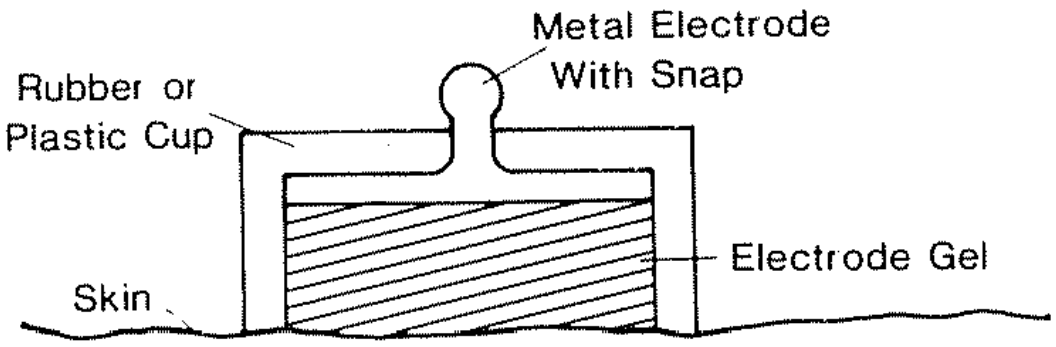
השימוש בקרם וג'ל לצורכי תפעול האלקטרודות

כמעט בכל סוגי האלקטרודות של EMG נדרש שימוש בג'ל או קרם. יכולת החדירה של קרם או ג'ל מוליכי חשמל לנקבוביות וכפלי העור מאפשרת יצירת מגע רציף וטוב בין העור לאלקטרודות (ראה תרשים מספר 4.2). לחומרים אלה תכונות מוליכות שונות - חלקם טובים מהאחרים. כעקרון ככל שהמוליכות גבוהה יותר החומר מתאים יותר לאפליקציה בביו-פידבק שכן המוליכות מקטינה את כמות אבדן האותות בדרכם מן העור אל האלקטרודות. ואולם הבדל זה זניח ברוב המקרים הודות למפרט האלקטרוני המשוכלל המאפיין את מכשירי ה EMG האיכותיים יותר.

הכנת משטח העור

הכנה שגרתית של העור כוללת הסרת לכלוך, שומנים, תאי עור מתים, ואיפור. כל אלה מפריעים למעבר של אותות ביו-חשמליים מהעור לג'ל המוליך. המלצות היצרנים לתהליך זה כוללות שימוש בחומרי קרצוף ושפשוף של העור, או שימוש במקלוני אלכוהול לניקוי משטח העור.ניקוי לא יסודי עשוי דווקא ליצור טעות של קריאה גבוהה מדי של ה EMG למרות שתופעה זו נוטה לקרות רק בנוכחות עור שומני במיוחד או מכוסה באיפור. לעומת זאת ישנו גם סיכון של הכנת יתר (קרצוף חזק מדי של העור), המתבטא בעור מגורה (ולפיכך גם לעתים מטופל לא שקט). אין כל צורך בקרצוף העור אלא אם כן שיירי לכלוך, שמנים, או איפור נראים בבירור לעין. למעשה קימים מכשירי EMG מיוחדים (המשמשים בשיקום נוירו-שרירי) אשר פועלים באמצעות אלקטרודות פשוטות ואינם מצריכים כל שימוש בג'ל או הכנה מוקדמת של משטח העור.

ככלל ניתן לצפות שהאלקטרודות המסופקות עם מכשיר ה EMG יפעלו כהלכה עם אותו מכשיר בהנחה שהמשתמש ממלא אחר הוראות השימוש והתחזוקה של היצרן.



תרשים 4.2 אלקטרודת EMG וג'ל

אבחנה בין אנרגית EMG לאנרגיות חיצוניות ("רעש")

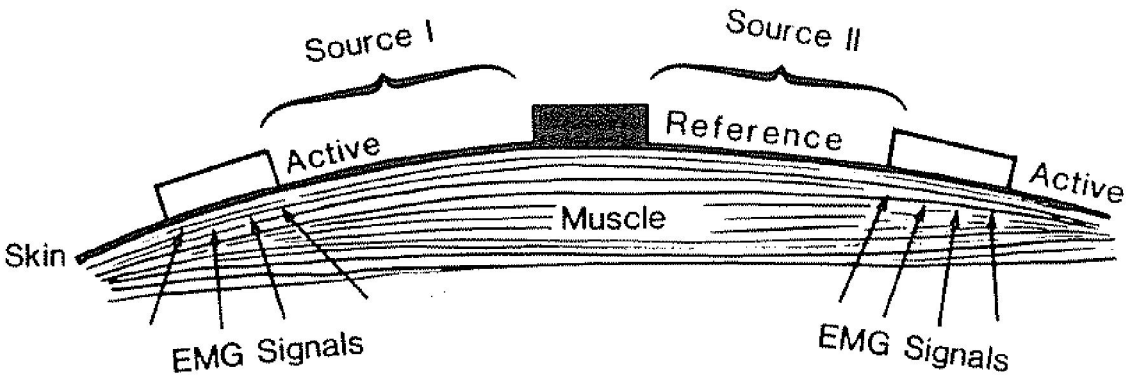
"רעש" הוא המונח המקובל לאותות לוואי לא רצויים. במכשירי EMG קיימים שני סוגי רעש: הפרעות חשמליות ורעשים עצמיים.

הפרעות חשמליות ומגבר דיפרנציאלי

הסביבה הטבעית ספוגה דרך קבע באנרגיה חשמלית המוקרנת בחלל האוויר מקווי מתח גבוה, מנועים, מנורות, מכשירי חשמל, ותחנות שידור (רדיו, תקשורת סלולארית, טלוויזיה). הגוף שלנו ואלקטרודות ה EMG קולטות אנרגיה זו. כך קורה שמכשיר ה EMG קולט אותות של רעשים חשמליים לא רצויים בנוסף לאותות הביו-אלקטריים שמקורם בשרירים, ואשר אותם אנחנו מעוניינים לקלוט. על מכשיר ה EMG מוטלת החובה להשתיק את הרעשים כך שרק האותות של ה EMG יוותרו.

הרבה הפרעות ורעשים ניתן לבטל באמצעות "מגבר דיפרנציאלי" העושה שימוש מתוחכם בתהליך הפחתה חשמלית. האלקטרודות מתבססות על שלשה מסלולים עצמאיים מאזור מסוים על פני העור לעבר מכשיר ה EMG.

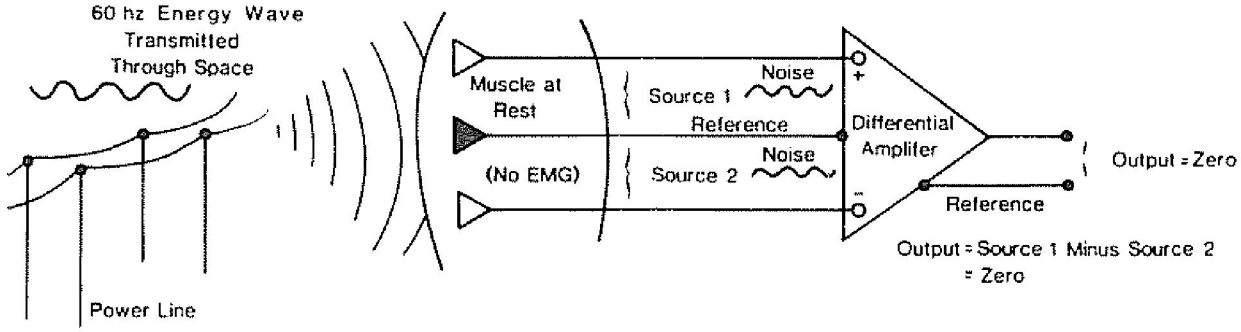
מסלול אחד כזה, הנקרא "ייחוס" משמש למכשיר כנקודת ייחוס ממנה נמדד מפל המתח החשמלי (וולט, V) הנמוך מאד המופק משתי האלקטרודות ה"פעילות". יש לזכור שמתח חשמלי מוגדר כהפרש הפוטנציאל החשמלי בין שתי נקודות. ללא נקודת ייחוס אין משמעות למדידת מתח חשמלי. כתוצאה מכך מתקבלים שני "מקורות" מתח במכשיר המדידה שאלקטרודת הייחוס משמשת עוברם נקודת ייחוס (ראה תרשים מספר 4.3). ניתן למקם את אלקטרודת הייחוס כמעט בכל מקום על פני הגוף, ואולם בתרשים 4.3 היא ממוקמת בין שתי האלקטרודות הפעילות לצורך הדגמה וגם משום שכך נוהגים בדרך כלל.



תרשים מספר 4.3 אלקטרודות פעילות וייחוס של EMG

שני המקורות נדרשים למגבר הדיפרנציאלי לצורך האבחנה בין אנרגית EMG לאנרגיות חיצוניות. להמחשת הצורך באבחנה זו נזכור שאנרגיה חיצונית היא הזמזום או רעש הרקע הבוקע מקווי מתח גבוה, מנועים, ומכשירי חשמל, ואשר נקלטים על ידי הגוף המשמש כאנטנה לצורך זה. על פי רוב לרעשים אלה מחזוריות קבועה של עליה וירידה בעוצמה (60 תנודות לשנייה). בכל רגע נתון אנרגיית הרעש היא בעוצמה קבועה מסוימת במחזור שלה ("בפאזה") בכל נקודה שהיא על פני הגוף, ובהתאם לכך בכל מקום בו ניתן להצמיד אלקטרודה. לפיכך מסוגל המגבר הדיפרנציאלי להפחית את מתח המקור 1 מזה שבמקור 2 באופן רציף. הפחתה זו מבטלת את מתח הרעש. תרשים מספר 4.4 מתאר פעולה זו באופן סכמטי ומפושט יותר, ובהנחה שהשריר נמצא במנוחה ואינו משדר כל אות של EMG. להלן פרוט האירועים המתוארים בתרשים 4.4 :

1. רעש חשמלי נקלט על ידי הגוף המשמש כאנטנה.
2. הרעש הנקלט הוא באותה פאזה (ולכן באותה עוצמה) על פני שתי האלקטרודות הפעילות ולכן,
3. קלט הכניסה (ממקורות 1 ו 2) של המגבר הדיפרנציאלי "מזהה" בדיוק אותה עוצמת רעש בכל רגע נתון (רעש משותף: " Common-Mode "). ומאחר ו-
4. פלט היציאה של המגבר הדיפרנציאלי פרופורציוני להפרש האותות המתקבלים בקלט הכניסה (ממקורות 1 ו- 2), וגם
5. אותות הרעש תמיד זהים (כאמור בנקודה 3 לעיל). לפיכך
6. פלט היציאה של המגבר הדיפרנציאלי הוא אפס לגבי רעש חשמלי.



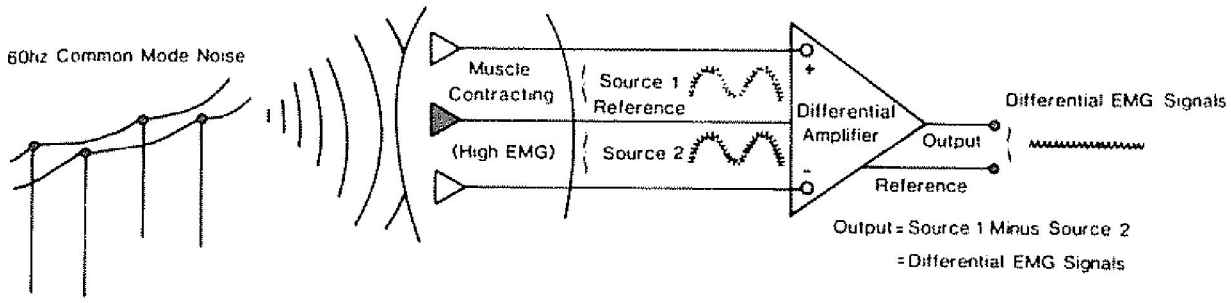
תרשים מספר 4.4 מגבר דיפרנציאלי מסיר את הרעשים החשמליים הנקלטים על ידי הגוף המשמש כאנטנה

אבל מה בנוגע לאותות ה- EMG ?

נניח שנוירונים מוטוריים משדרים כעת הוראה (אות) לשריר שבמנוחה להתכווץ. כל אלקטרודה קולטת אותות טוב יותר ככל שהיא קרובה יותר לשריר. מכיוון שהאלקטרודות מרוחות לאורך השריר, הן קולטות אותות EMG מדפוסים שונים. באנאלוגיה: אילו הנחנו שני מיקרופונים באולם מלא באנשים מדברים, כל אחד מהם היה מראה דפוס שונה של צלילים, גם אם העוצמה הכללית של השמע הנקלטת בכל מיקרופון זהה. לפיכך בכל רגע נתון, האלקטרודות מזינות את המגבר הדיפרנציאלי באותות EMG "דיפרנציאליים" המורכבים (נוספים ל) אותות ה"רעש המשותף" (Common-Mode) הזהים עבור שניהם.

ועתה, כאשר המגבר הדיפרנציאלי מפחית באופן קבוע את האות ממקור 2 מזה המתקבל ממקור 1 (ובכך מגביר רק את ההפרש שבינם) אותות הרעש המשותף (Common-Mode) מבטלים זה את זה, בעוד ש הפרשי אותות ה – EMG מותירים תמיד הפרש חיובי כלשהו במוגבר ומוצג לבסוף על שעון התוצאות. תרשים מספר 4.5 מדגים גרפית את פעולת המגבר הדיפרנציאלי של ה – EMG ותאור התהליך הינו כדלקמן:

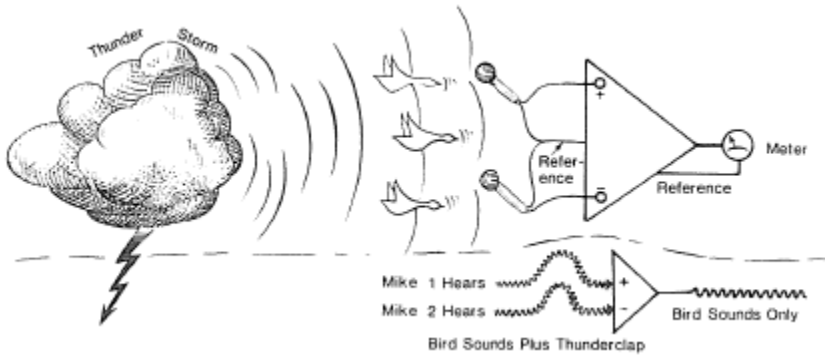
1. אותות שונים של EMG מגיעים לשתי אלקטרודות כשהשריר מתחתן מתכווץ. לכן,
2. מקורות 1 ו-2 מזינים את כניסת המגבר הדיפרנציאלי באותות EMG שונים בעוצמתם. בו בזמן ש,
3. רעשי רקע משותפים (Common-Mode) מתווספים לאותות ה – EMG השונים בעוצמתם. לפיכך,
4. הכניסות למגבר (ממקורות 1 ו-2) "רואות" סימנים מרוכבים בעלי רכיב משותף (Common-Mode) ורכיב שונה (אותות EMG שונים בעוצמתם). מכיוון ש
5. יציאת המגבר הדיפרנציאלי פרופורציונית להפרש שבין שני אותות הכניסה (ממקורות 1 ו-2), וגם
6. חלק מהאותות זהה (Common-Mode) וחלק שונה (Differential-Mode) (חזרה על נקודה 4 לעיל), לכן
7. הפלט של יציאת המגבר הדיפרנציאלי הו אפס עבור רעש הרקע המשותף (Common-Mode) וגבוה מאפס עבור אותות ה- EMG השונים (Differential Mode) .



תרשים מספר 4.5 מגבר דיפרנציאלי מסיר את רעש הרקע המשותף (common-mode interference) ומגביר הפרשים באותות ה- EMG.

דוגמאות

ננסה להמחיש יותר את תפקוד המגבר הדיפרנציאלי באמצעות הקבלה, למרות שהיא לא ממש מעשית. הבה נדמיין שהצבנו שני מיקרופונים בחלל האוויר כדי שיקלטו ציוץ ציפורים מלהקה סמוכה (ראה תרשים 4.6). כל מיקרופון קולט קולות שונים במקצת ממשנהו, משום שכמה ציפורים קרובות יותר לאחד מאשר לאחר. לפיכך אם יוזרמו האותות הנקלטים למגבר דיפרנציאלי אשר מפחית אות אחד ממשנהו, תוצאת היציאה שלו תראה תמיד איזו שארית חיובית. ככל שתגבר עוצמת הציוצים כן תגדל השארית המתקבלת ביציאת המגבר. השארית מוזנת למד עוצמת קול אשר מציין את עוצמת הציוץ. כעת נניח שסערת רעמים חולפת באזור ופולטת ברק חזק מאד המלווה בפיצוץ רעם עז. הרעם מתפשט בכל הכיוונים כגל הדף (קול) ומגיע בסופו של דבר גם למיקרופונים. מאחר ומוקד ההתפשטות של הרעם מרוחק מהמיקרופונים, והמיקרופונים נמצאים בסמיכות זה לזה, הוא מגיע אל



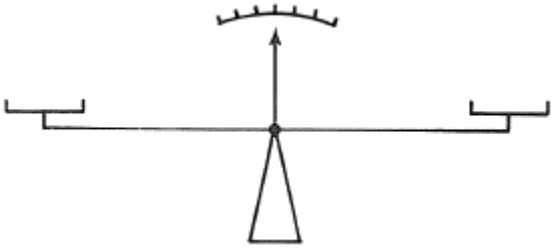
תרשים 4.6 אנלוגיה להפחתת רעש באמצעות מגבר דיפרנציאלי

שניהם בו-זמנית ובעוצמה זהה. המיקרופונים קולטים את קול הנפץ ומזינים אותו למגבר הדיפרנציאלי, בנוסף לקולות הציוץ שהם קולטים באותו רגע. מכיוון שהמגבר הדיפרנציאלי מפחית את אותות המיקרופון האחד ממשנהו (כלומר מגביר את ההפרשים בין שניהם), מצטמצם קול הנפץ (מתבטל בפעולת החיסור), אך לא קולות הציוץ, שכן הם נקלטים כשונים בשני המיקרופונים.

למרות שהתקנה מיוחדת זו לא הייתה מצליחה באורח מעשי להסיר את קול הרעם מציוץ הציפורים , די בה כדי להדגים את העיקרון של סילוק רעשי רקע מאותות EMG. קולות הציפורים מייצגים את הפעילות החשמלית של סיבי השריר מתחת לאלקטרודות. המיקרופונים מייצגים את ה"מקורות" שתוארו קודם לכן משתי האלקטרודות הפעילות ואלקטרודת הייחוס. הרעם מייצג את רעש הרקע הבוקע מקווי המתח המרוחקים ומשודר דרך חלל האוויר. המגבר הדיפרנציאלי שווה בשני המקרים, ומד עצמת הקול מייצג את מד רמת ה – EMG.

נשים לב שהסרה אפקטיבית של רעש תתרחש רק אם אותות הרעש שווים בעצמתם ובמופע שלהם. אחרת תהליך ההפחתה יסתכם בשארית חיובית של רעש במוסף לשארית החיובית של EMG. תופעה כזו יכולה לקרות בדוגמת ציוץ הציפורים אם אחד המיקרופונים רגיש פחות ממשנהו. תוצאה דומה לכך עשויה להתקבל במדידת EMG תוך שימוש באלקטרודות פגומות או מגע רופף עם העור. במקרה כזה תתקבל תוצאת מדידה שגויה גבוהה משום שאלקטרודה "פחות רגישה" מפירה את האיזון של האות המשותף (common mode) המוזן למגבר הדיפרנציאלי.

דוגמא נוספת מבהירה באופן מדויק עוד יותר את פעולת המגבר הדיפרנציאלי. הבה נדמיין מאזניי שקילה רגישים המשמשים כימאי, על שתי כפותיהם, נקודת המשען במרכזם, וסט של משקולות (ראה תרשים 4.7). ללא משקולות בכפות המאזניים, המאזניים שקולים. הם שקולים גם כשמשקולות שוות מונחות על שתי הכפות. גם אם נרחיק בדמיוננו ונתאר לעצמנו תרחיש בו משתנות המשקולות ברציפות לאורך זמן אבל בכל זמן נתון הן שוות על כל אחת מהכפות יישמרו המאזניים על איזונם. ואולם די בנחיתת זבוב על אחת מהכפות כדי להפר את האיזון, והמחוג יוטה מהמרכז והלאה. יתרה מכך – אפילו אם שני זבובים זהים במשקלם יקפצו כל אחד על כף אחרת במקצב ייחודי ינוע המחוג מצד לצד. מידת הסטייה מהמרכז מבטאה בכל רגע נתון את הפרש המשקל בין שתי הכפות. רק הבדלים במשקלות עשויים לגרום לתזוזת המחוג מהמרכז.



תרשים מספר 4.7 מאזני שקילה של כימאי כאנאלוגיה למגבר דיפרנציאלי.

בשלב זה עשוי הקורא לראות במגבר הדיפרנציאלי מעין גרסה אלקטרונית של מאזני הכימאי. טבלה 4.1 ותרשים 4.8 מדגימים את המתאם בין השניים.

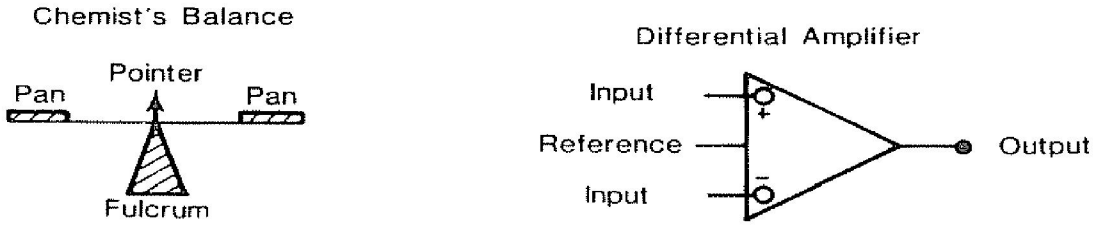
הדיון המקדים בנושא המגבר הדיפרנציאלי מבהירים מדוע אלקטרודות פגומות או מגע רופף (בעל התנגדות גבוהה) עם העור עלולים להוראת EMG מוטה למעלה. אלקטרודה אקטיבית למשל, הנמצאת במגע רופף עם העור תזין את המגבר באות מופחת. מאחר והאלקטרודה האחרת מעבירה אות בעוצמה מלאה למגבר הדיפרנציאלי, אות רעש המשותף המועבר לשתי הכניסות שונה בעוצמתו. לפיכך כאשר מתבצע תהליך החיסור במגבר נותר גם רעש כשארית בנוסף ל EMG, אשר מוסיף לגובה הקריאה הנמדד. תרשים 4.9 מדגים זאת בצורה גרפית. יחס הגברת אות דיפרנציאלי להגברת אות משותף עבור מגבר דיפרנציאלי מסוים נקרא "יחס הנחתת אות-משותף" ("common-mode rejection ration"). יחס זה גבוה יותר ככל שעולה איכות המכשיר.

"עכבת כניסה" ("Input impedance") היא תכונה במפרט המגבר הדיפרנציאלי המציינת את יכולתו להגן מפני אי-דיוקים הנובעים מחיבור אלקטרודות לא מאוזן. ערך זה הוא גבוה למדי במכשירים משובחים. הרחבת בנושאים אלה היא מעבר לתחום שהוגדר לפרק זה.

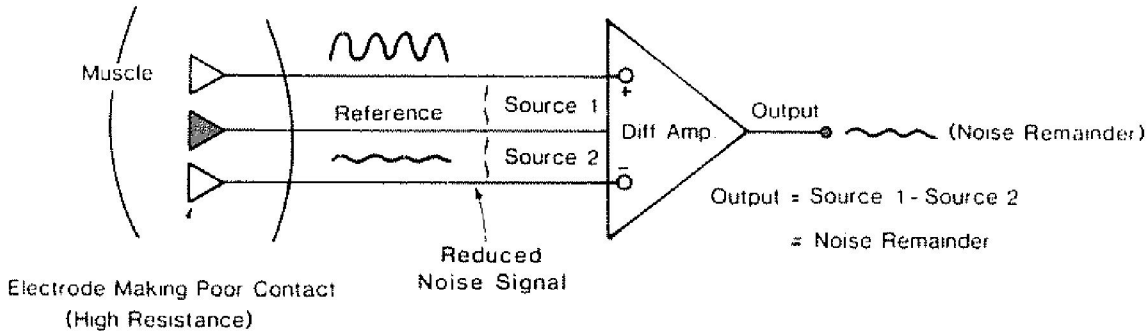
טבלה 4.1 התאמה בין מאזני כימאי ומגבר דיפרנציאלי

מאזני כימאי	מגבר דיפרנציאלי
1. כפות	1. כניסות
2. מחוג	2. יציאות
3. נקודת משען	3. ייחוס
4. משקל שווה על הכפות ← איזון (המחוג נותר זקוף)	4. אות משותף ← פלט אפס
5. משקולות שונות על הכפות ← איזון מופר (מחוג מוטה)	5. אותות שונים ← פלט שונה מאפס
6. שתי משקולות שוות על הכפות	6. אות משותף
וגם	***וגם***
שתי משקולות שונות על הכפות	אותות שונים
← איזון מופר	← פלט שונה מאפס
(המחוג מבטא את הפרשי המשקל בין המשקולות השונות בלבד – המשקולות השוות מצטמצמות ומבטלות	(הפלט מבטא את ההפרש בין האותות הדיפרנציאליים בלבד, שכן האות

אחת את השנייה). המשותף מצטמצם ומתבטל).



תרשים 4.8 ייצוג גרפי של הנתונים מטבלה מספר 4.1



תרשים 4.9 קלט אות משותף לא שווה הגורם לשיור רעשים.

רעש פנימי: מסננים ורוחב-פס: (Filters and Bandwidths)

המשימה של הסרת אותות רעשים חיצוניים עדיין לא נשלמה. "מסננים" חשמליים מפחיתים עוד יותר את ההפרעות שנובעות מקווי מתח גבוה ומגבילים אף את הרעש הבלתי נמנע שנוצר על ידי מעגלי מגברי ה EMG עצמם. מסננים אלה מקבילים לכפתורי בקרת הטון של מגבר סטריאופוני, למעט העובדה שהם מקובעים ברמה קבועה בעת הייצור. מטרתם היא להגביר את רגישות המגבר לאותות נכנסים בתדירות (גובה צליל) מסוימת ולהפחית את רגישותו לאחרים.

דיבור או מוסיקה מבוססים על קשת רחבה של תדירויות או גבהי צליל המשתלבים יחד ליצירת צלילים מוכרים. בקרת טון משנה אותם ע"י הוספה או הפחתה של בס וטרבל בהתאם להעדפות המאזין. הפחתת טרבל לדוגמא בתקליט שרוט במיוחד עשויה לשפר בהרבה את איכות השמע ע"י הפחתה משמעותית של קולות השריטה והשריקה המתאפיינים בתחום התדירויות הגבוהות. הורדת מרכיב הבס בדוגמא אחרת תשפר את איכות השמע במגבר המזמזם. בשני המקרים, נעשה שימוש בשינוי רגישות המגבר בתחום תדירויות או "רוחב-פס" או " תצורת פס" .

יש הצדקה לנהוג באופן דומה עם יחידת EMG. למשל, חלק ניכר של ההפרעות החשמליות שמקורן בקווי המתח הגבוה מרוכז בטווח מצומצם של כ 60 מחזורים או תנודות לשנייה (הרץ). כל מי שהתנסה בסטריאו מזמזם מכיר רחש זה. על מנת להקטין עוד יותר רעש כזה מסנן מיוחד הופך את מגבר ה EMG להרבה פחות רגש לגובה צליל זה. ועוד יותר אופייני מכך , כל תצורת הבס של המגבר מוסרת כדי להקטין עוד יותר את ההפרעות החשמליות הנותרות ביציאת המגבר הדיפרנציאלי. מגבלת בס או רוחב-פס תדירות נמוכה היא כ -100 הרץ.

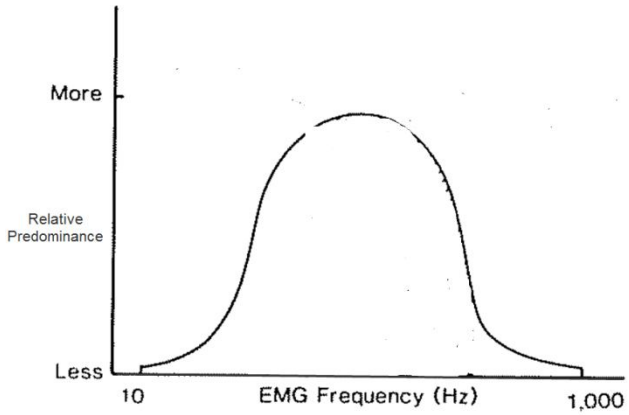
יש גם סיבה טובה להגביל את רגישות התדירות של הטרבל במגבר ה- EMG . כל המגברים יוצרים בסופו של דבר רעש צליל גבוה מתוך המעגלים שלהם עצמם אשר נשמע כרחש (צליל מוכר לכ מי שמפעיל סטריאו). בקרת

הטרבל במגברי ה – EMG מוגבלת בדרך כלל מעל לתדירות מסוימת (למשל מעל ל 1000 הרץ) כדי להפחית רחש זה. הרגישות לתדירויות מוגבלת באופן מובנה בכל מגברי ה- EMG כדי להקטין את רעשי הלוואי המפריעים להוראת המכשיר.

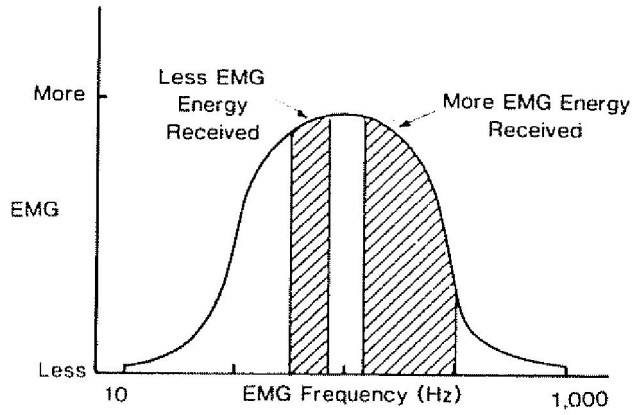
המרווח שבין תחום תדירות הבס לתחום תדירות הטרבל נקרא "רוחב-פס". רוחב הפס תוחם את התדירויות או גובה הצלילים עבורם רגישות המגבר היא הגבוהה ביותר. המגבר רגיש פחות לתדירות ככל שהיא רחוקה מאלה התחומות על ידי רוחב הפס.

כמו בדיבור ובמוסיקה מכילים אותות ה- EMG תחום רחב של תדירויות או צלילים המשתרע בדרך כלל בין 10 לאלפי הרץ. תרשים 4.10 מראה התפלגות אופיינית של אותות EMG היפותטיים. הגרף בתרשים 4.11 מראה שני רוחבי פס מושלמים (אידיאליים) הנשאים על גבי התפלגות תדירות EMG היפותטית. הגרף מדגיש את העובדה שלמרות הגבלת בקרת הבס והטרבל מגבר EMG עדיין רגיש לכמויות גדולות של אנרגיית EMG .

בשני המקרים רוחב הפס של המגבר (תחום רגישותו) מקיף תחום רחב של אנרגיית EMG. ברם הפס הרחב יותר מכיל יותר אנרגיית EMG (ורעש) מאשר הפס הצר יותר. המשמעות המעשית (בהנחה ששאר הגורמים המשפיעים שווים) היא שהמגבר המצויד ברוחב-פס גדול יותר יראה קריאות גבוהות יותר מזה של המתוכנת עם רוחב-פס קטן יותר.



תרשים 4.10 התפלגות אופיינית של אותות EMG היפותטיים.



תרשים 4.11 שני רוחבי פס היפותטיים.

ניתן להדגים תופעה זו גם באמצעות מכשיר סטריאו. כוונן כפתור הבס והטרבל עד למינימום האפשרי מצמצם את רוחב הפס וגורם לא רק להשמעת צליל אחר אלא גם לעוצמת שמע נמוכה יותר. הדברים נכונים גם עבור רעש. הפס הרחב יותר מכיל גם יותר רעש בנוסף ל EMG. שיעור הרעש מתוך סך הקריאה (היחס "אות-לרעש") יכול להיות זהה בשני המקרים, אבל רמות ה- EMG והרעש תהיינה גבוהות במגבר בעל רוחב-פס גדול יותר.

מכשירי EMG לביו-פידבק מיוצרים עם רוחבי פס שונים המתאימים לתפיסות עיצוב שונות. משמעות הדבר היא שהוראת חלק מהמכשירים גבוהה מזו של אחרים הן של אותות EMG והן של רעשים. לא ניתן לומר בוודאות שהתפיסה האחת טובה ממשניה שכן מכשירים בעלי רוחב-פס שונה מפיקים תוצאות טובות לצורכי בקרת EMG לביו-פידבק. המסקנה החשובה ביותר מכך היא ***שרוחב-פס שונה יביא להצגה שונה של תוצאות המדידה***. יש להביא זאת בחשבון כשעורכים השוואה בין תוצאות ורעש שנמדדו על ידי דגמים שונים של מכשירי EMG .

בהנחה שכל שאר התכונות שוות ניתן לומר שככל שרוחב הפס גבוה יותר, כך תעלה תוצאת המדידה של V EMG והרעש. כתוצאה מכך נדרשים המשתמשים בציוד ה EMGלהעריך את המפרט של דגם מסוים בהקשר של עיצוב המכשיר בכללותו. לדוגמא מכשיר בעל מפרט רעשים ורגישות נמוכים אינו בהכרח יותר רגיש או עמיד בפני רעשים ממכשיר אחר: ייתכן שיש לו פשוט רוחב-פס נמוך יותר. קוראים המעוניינים להרחיב את ידיעתם בתחום התפלגות תדירויות EMG, מסננים, ורוחב-פס יכולים לעיין ב (Mathieu & Sullivan, 1990).

הסבת אנרגיית EMG למידע

עד כה נוכח הקורא לדעת איך נלקחת אנרגיית ה EMG מהעור וכיצד היא מופרדת מאנרגיית רעשי הרקע. האותות המתקבלים מתייחסים ישירות לפעילות החשמלית של הנוירונים המוטוריים בשריר הנבדק והם מכונים בדרך כלל "EMG גולמי".

EMG גולמי

EMG גולמי דומה לרעש סטטי או קול מים זורמים, שעוצמתו גוברת ונחלשת בהתאם לכיווץ השריר. EMG "גולמי" זה או EMG לאחר "סינון גולמי" זה הוא צורה אחת של ביו-פידבק קולי. מכשירי EMG מסחריים אינם מספקים בדרך כלל פלט בצורה זו של ביו-פידבק קולי. לחילופין יוצג הפלט כצליל או מערכת של צפצופים (ביפים) ונקישות (קליקים). גובה הצליל או קצב החזרה מותאם יחסית למשרעת או "עוצמת" ה EMGהגולמי, ולפיכך גם למידת כיווץ השריר. משרעת EMG גולמי ניתנת להצגה גם באמצעות שעון מידה, אף כי הצגה כזו מצריכה עיבוד נוסף.

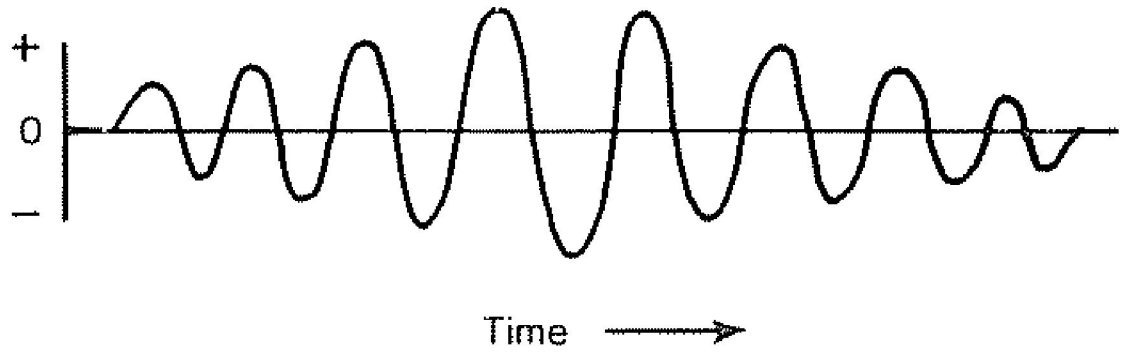
החלקה וסכימה (אינטגרציה)

"החלקה" ו "סכימה" מתייחסים לשתי צורות עיבוד של אות ה- EMG. שתיהן מאפשרות כימות של אנרגיית EMG על ציר הזמן. "החלקה" משמעה יישור שיאים ונקודות שפל של אות חשמלי משתנה. "סכימה" היא מונח מתמטי לחישוב שטח מתחת לעקום.

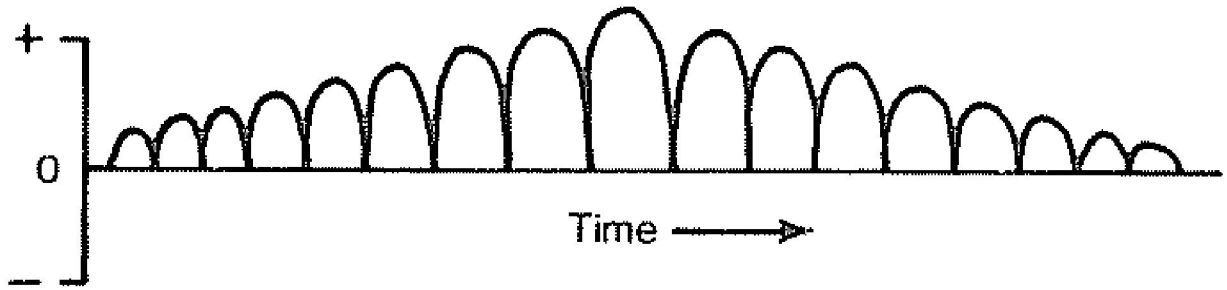
יישור ויצירת פעימות (פולסים) לקבלת זרם ישר

EMG גולמי הוא אות מסוג זרם חילופין (AC) (במקרה זה מתח חילופין). מתח חילופין יוצר תנודות הלוך וחזור בדומה לקנה סוף הנע עם הרוח או מטוטלת שעון אורלוגין, כפי שמתאר גרפית תרשים מספר 4.12. העקום מייצג את שינוי הלחץ החשמלי על פני ציר הזמן, תחילה בכיוון אחד ולאחר מכן בכיוון ההפוך. הצד החיובי + מסמל לחץ בכיוון אחד, ו ה – מסמל לחץ בכיוון ההפוך. הציר במרכז מציין את נקודת האפס של המתח בוולטים, בדומה לקנה הסוף במנוחה או הנקודה התחתונה ביותר של המטוטלת. גובה הגל מייצג את שיא המשרעת שלו או המתח הגבוה ביותר בכל מחזור. תרשים 4.12 מתאר אות חשמלי ה"רוטט" בתדירות מסוימת (מספר תנודות לשנייה, או הרץ).

בנוסף לרטט, משתנה המשרעת או עצמת התנודה כך שקודם היא מתגברת עד לנקודת השיא ולאחר מכן נחלשת עד לנקודת השפל. מדידת סך עלייה זו והירידה העוקבת אחריה היא המשמעותית ביותר בתהליך מעקב אחר ה-EMG בביו-פידבק. הצעד הראשון להשגת מטרה זו הוא "היפוך" השיאים בצד השלילי והצבתם בצד החיובי של קו האפס לצד השיאים בצד החיובי, בתהליך המכונה "יישור". ללא יישור יאפסו הצדדים השלילי והחיובי אחד את משנהו כך שסכומם יהיה תמיד אפס. ללא יישור יקשה הזיהוי של מגמות כלליות בעוצמה אלא אם כן בוחנים את התנודות במתנד אלקטרוני (Oscilloscope) או על ידי האזנה ל-EMG הגולמי באמצעות רמקול. תרשים 4.13 מראה גל EMGמיושר. השיאים השליליים הועברו אלקטרונית לצד החיובי בסמוך לשיאים החיוביים, כך שכל השיאים הם חיוביים. המשמעות של צעד זה היא שהאות החשמלי דוחף כעת רק בכיוון אחד, וכאן מקור השם "זרם ישר" (Direct Current, DC). בדוגמא זו הזרם הוא "זרם פעימות (פולסים) ישר".



תרשים 4.12 מתח חילופין עולה בהדרגה ואחר כך יורד.



תרשים 4.13 מתח חילופין מיושר.

החלקת אות ה EMG לצורך כימות עיתי (על פני ציר הזמן).

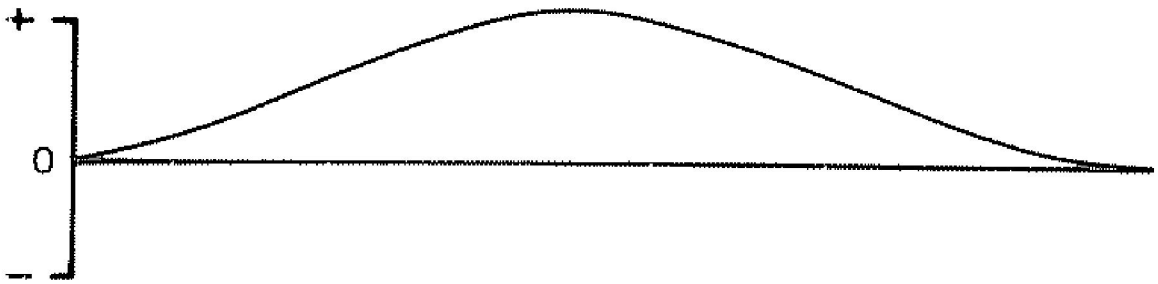
אם המתח בתרשים 4.13 מופנה למד מתח ישר המציג את הקריאה ע"י מחוון מסוג מחט, המנגנון והמחוון הצמוד לו יצביעו לצד החיובי. ברם התמדה מכאנית תמנע מהמנגנון לעקוב אחר כל פעימת מתח מהירה. הוא יבצע למעשה החלקה של הפעימות על ידי הצגת ערך מתח נמוך קמעא משיא המתח של פעימות ה- EMG החיוביות הרציפות. הערך המוצג יקביל בקירוב לקו המחבר את כל ערכי השיא של פעימות ה- EMG הרציפות. המתח בעל הרמה המשתנה הזו מכונה "מיושר ומוחלק", או "EMG מסונן " , והוא מתואר בתרשים 4.14. ערך המתח שלו הוא הממוצע המתמטי של מתח ה- EMG המיושר עבור אות EMG קבוע-משרעת (בעל עוצמה קבועה). עבור אות ה EMG בעל משרעת משתנה המתואר בתרשים 4.12, האות המוחלק יהיה ממוצע נע עיתי אשר "זמן המעקב" שלו תלוי ב "קבוע הזמן" האינרטי של תנועת המחוון האלקטרו-מכני. ערך המתח של הממוצע הנע העיתי (מבוטא במיקרו-וולטים) מציין כמותית את מתח ה– EMG בכל רגע.

רוב המחוונים המכאניים מגיבים מהר מכפי שנדרש לצורך החלקת שינויים במשרעת EMG, וקבוע זמן אינרטי זה אינו ניתן לשינוי. למרבה המשל, החלקה אלקטרונית או סינון ניתנים לביצוע על גבי אות ה- EMG המוחלק.

הפלטים של מעגלים מוחלקים מפעילים את המחוון, כמו גם מעגלי פידבק השמע אם נכללים במכשור. החלקה אלקטרונית היא חיונית במידה ומשתמשים במחוונים דיגיטליים, משום שהם משוללי אינרציה מכאנית הנדרשת להחלקת הפעימות.

מעגל החלקה אלקטרונית מגביר את אפקט ההחלקה המכאנית של המחוון המכאני. המעגל מתוכנן כך שהוא מוגבל לקצב שינוי פלט מרבי מסוים, מקביל לכבדות המכאנית של מחוון המחט. אפקט זה מושג של ידי שימוש במסנן (ראה תרשים 4.14) ומביא להחלקה של פעימות אות ה – EMG המיושר (ראה תרשים 4.13). יתרון גדול מושג בכך ש החלקה או סינון מעגלים אינו מוגבל לקבוע זמן או זמן תגובה מסוים, כפי שקיים במחוונים מכאניים. לפיכך נותר למעצבים מרחב גדול להגדרת מהירות תגובת המחוון לשינויים רגעיים ברמת ה-EMG (זמן מעקב).

הצורה הנפוצה ביותר של החלקה או סינון הנמצאת בשימוש במכשירי EMG מסחריים עושה שימוש בקבוע זמן מקובע ולפיכך גם בזמן מעקב מקובע, המתאימים לצרכי שימוש כללי. למספר מכשירי EMG ומערכות מבוססות מחשב יש זמן מעקב ניתן לכוונון על ידי המשתמש, הנדרש להחליט על מידת החלקת העקום הרצויה לו. כוונון זמן מעקב ארוך יגרום לפלט מוחלק יותר הרגיש פחות לתנודות מעלה ומטה ברמת ה EMG. פלט לא מוחלק עשוי להראות קופצני מדי לצורכי לימוד הרפיה, בעוד שפלט מוחלק מדי עשוי להעלים או לעכב מידע. אין עדיין רמה אופטימאלית מוסכמת של זמן מעקב. הבחירה נעשית על פי האפליקציה, טכניקה, והעדפה סובייקטיבית. לא נראה לי שיש אורך זמן מעקב מסוים עדיף במיוחד לאימוני הרפיה. נראה כי גם היצרנים שותפים לדעה זו, שכן המכשירים מוצעים עם רמות זמן מעקב מגוונות הנעות בין ערך קבוע לערכים ניתנים לכיוון.



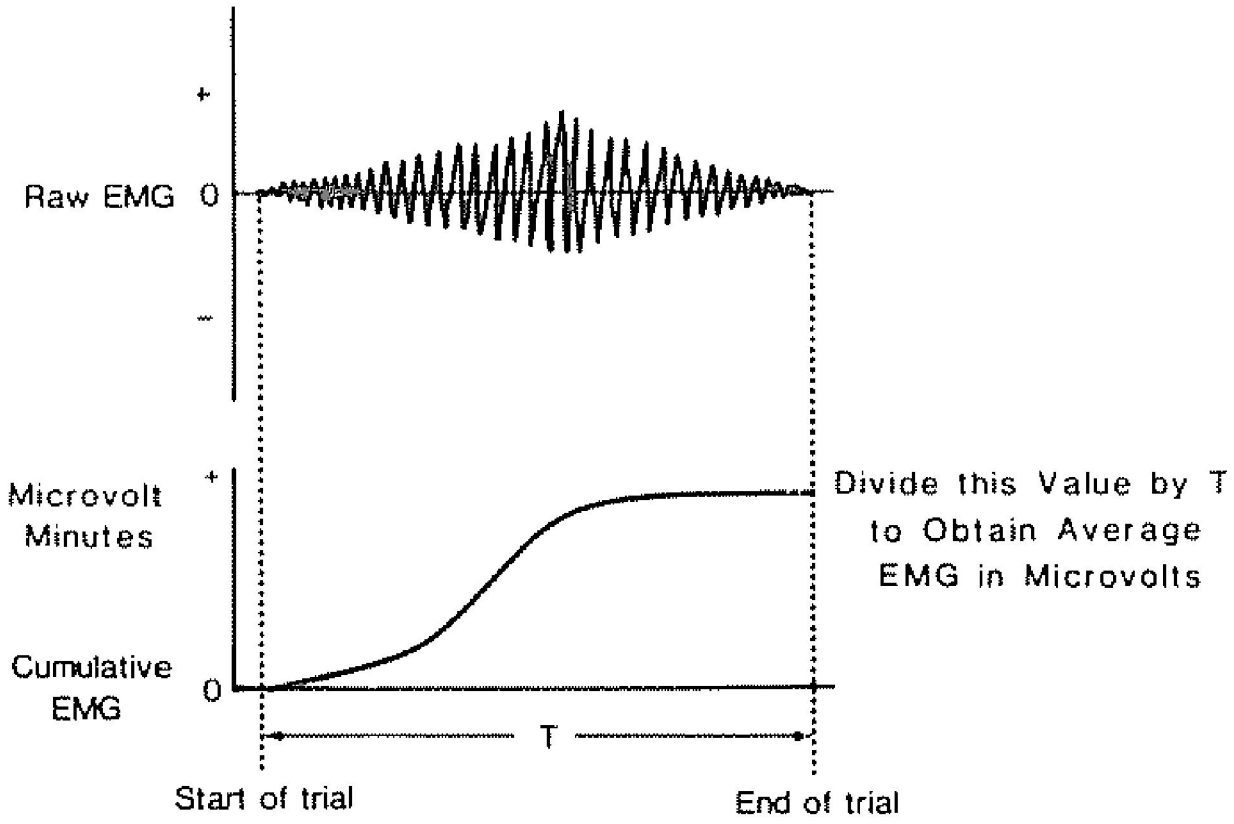
תרשים 4.14 מתח חילופין מיושר ומסונן או מוחלק.

סכימה של EMG מצטבר, או EMG ממוצע לאורך זמן קבוע.

שיטת כימות נוספת מבוססת על הצטברות השטח מתחת לעקום ה EMG (במיקרו וולט לשנייה) לאורך פרק זמן קצוב כך שהקריאה מתחילה באפס והולכת וגדלה ברציפות עד תום פרק הזמן.

השטח המצטבר בסוף הניסוי מציין את הסך המצטבר של דקות מיקרו-וולט EMG שהתקבלו בפרק הזמן הנמדד. חלוקת אינטגרל ה- EMG (מבוטא בדקות מיקרו-וולט) במשך הזמן (בדקות) תניב את הרמה הממוצעת של EMG (במיקרו-וולטים) במשך פרק הזמן הנמדד. לאחר מכן מאופסים הסוכם (אינטגרטור) וקוצב הזמן ומתחיל מחזור מידה חדש.

הסכימה מבוססת ניסיונות הרפיה של משכים ארוכים (למשל 30, 60, 120, או יותר שניות לניסיון). על בסיס מספר ניסיונות כאלה ניתן לערוך השוואות . תרשים 4.15 מדגים סכימה של EMG.



תרשים 4.15 סכימת EMG מצטבר או EMG ממוצע לאורך פרק זמן קבוע.

פידבק קולי (Audio Feedback)

פידבק קולי הוא מרכיב חשוב מאד בביו-פידבק משום שהמידע שהוא מעביר לא מצריך שימוש בחוש הראיה. פידבק קולי מקודד את עוצמת ה-EMG למונחי קול. דרך מקובלת לביצוע משימה זו היא לעשות שימוש באות ה-EMG המוחלק כדי לשנות את הצליל של מחולל צלילים אלקטרוני. ככל שרמת ה- EMG עולה, כך גבוה הצליל המתקבל. תהליך הסבת ה-EMG הגולמי לפידבק-קולי רציף של צלילים מוצג בתרשים 4.16

שיטה נוספת של פידבק קולי מבוססת על "צליל קצוב" . הצליל הנזכר לעיל מופסק כך שהוא מושמע כביפים המופרדים על ידי דממה. ככל שעולה רמת ה-EMG כך גבוה הצליל, וכך עולה תדירות הביפים. שיטה זו מאפשרת הבחנה ברורה גם בשינויים קטנים בעצמה.

טווח האפשרויות לביו-פידבק קולי הוא כמעט לא מוגבל, ואכן קיימות גרסאות מסחריות רבות של מכשירים כאלה. אין גרסה מיטבית של פידבק-קולי. העדפות מסתמכות על מדדים סובייקטיביים לחלוטין ועל דרישות היישום.

פידבק חזותי (ויזואלי):מדים

מד- אנלוגי המציג את אות ה-EMG המוחלק מספק אינדיקציה חזותית לעוצמת כיווץ השריר ברגע נתון. מידע זה משמש ליצירת סדרה כמותית של קריאות. רוב מדי ה-EMG מכוילים עם סקאלות של יחידות כמותיות כגון מיקרו-וולטים. אחרים מספקים רק סקאלה יחסית ללא כימות.

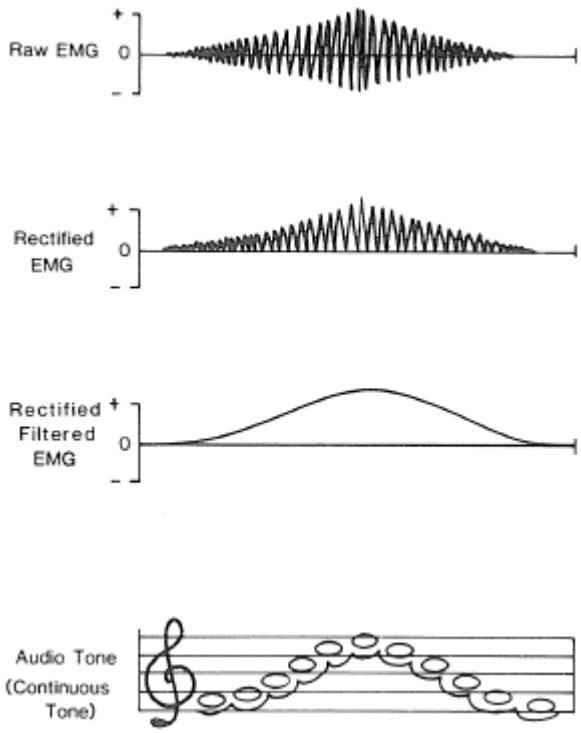
מכשירי ביו-פידבק עושים שימוש במדים דיגיטליים ואנלוגיים. מד דיגיטלי מציג מידע הנקרא ישירות מתצוגת ספרות משתנות בדומה למונה המרחק ברכב. מד אנלוגי עושה שימוש בסקאלה רציפה ומחוון נע בדומה למד

המירות ברכב. המשתמש קורא את תצוגת המד האנלוגי על ידי הערכה של הנקודה עליה מצביע המחוון. למרות האסוציאציה של היי-טק שמעורר מד-דיגיטלי, אין למהר ולפטור מדים אנלוגיים כטכנולוגיה שעברה מן העולם. לכל סוג יתרון משלו.

מדים דיגיטליים למשל, מצטיינים במדידה כמותית מדויקת של תחום רחב מאד. אלא שהמשתמש נדרש לקרוא ***במפורש*** את הספרות המוצגות כדי לקלוט את המידע המועבר. לעומת זאת, המיקום היחסי של המחוון ומגמת תנועתו מעבירים כמות רבה של מידע למשתמש ללא כל צורך בקריאה של ספרה כלשהי. פידבק מצריך מאמץ מינימאלי מצד המשתמש. אפילו ראייה היקפית מספיקה כדי לזהות רמות ושינויי מגמה. תזוזת מחוון על פני סקאלה רחבה של שעון מידה יכולה להיות דרך הצגת מידע פשוטה בתכלית ומובנה מאליה.

בניגוד לכך הספרות המשתנות במד דיגיטלי אינן כה נוחות או ברורות אינסטינקטיבית למשתמשים מסוימים. יתרה מכך, סקאלת המד-האנלוגי תוחמת במפורש את תחום התוצאות הנמדדות ולפיכך מספקת הקשר כמותי לכל קריאה. הביטוי "מחוץ לסקאלה" מתייחס לתכונה זו של סקאלת המד האנלוגי. כשמשתמשים במד-דיגיטלי לא ברור מהתצוגה אם הקריאה המסוימת שייכת לתחום העליון או התחתון של התחום אלא אם כן זוכרים בכל עת את תחום המספרים השייכים לקריאה הדיגיטאלית. לסיכום, מדים דיגיטליים עדיפים למטרות מסוימות, ומדים אנלוגיים עדיפים לאחרות.

תצוגות דיגיטליות בעזרת מחשב נבדלות באותו אופן במידת תשומת הלב הנדרשת כדי לקלוט ולפרש את המידע המוצג. חלקן מציגים מספרים או מידע דומה הדורש רמת ריכוז גבוהה יותר בעוד שאחרות מתבססות על שיטות הצגה פשוטות יותר כגון גרפים של קווים או עמודות.



תרשים 4.16 תהליך הסבת EMG גולמי לפידבק-קולי רציף של צלילים

יחידות מידה אובייקטיביות

יש מספר גורמים המשפיעים על תוצאת מדידת ה-EMG במיקרו-וולטים לבד ממידת כיווץ השריר. כזכור מהפסקה למעלה בנושא ההחפצה והמדידה, יחידת המידה של ה-EMG היא מיקרו-וולט. זהו מונח חשמלי המשמש למדידת כיווץ שריר. ולמרות זאת, המיקרו-וולט אינו מודד באמת את מידת כיווץ השריר. הוא מודד תופעה חשמלית המקבילה לכיווץ השריר. לפיכך מתאפיינת מדידה זו בתכונות של המכשיר החשמלי (יחידת EMG) המבקר ומעבד את אותות ה-EMG. מכשירי EMG שונים מבוססים על עקרונות עיצוב שונים, ומשום כך ניתן לצפות לתוצאות מדידה שונות שיתקבלו עבור כל נבדק או מתח שריר נתונים. כתוצאה מכך, רק מדידות שנעשו במכשירים זהים מבחינת רוחב הפס ושיטת הכימות שלהם ניתנות להשוואה אובייקטיבית במיקרו-וולט.

מכשירי EMG הינם מדי מתח חילופין והם מספקים תוצאות אובייקטיביות המבוטאות בוולטים של מתח כזה. ואולם התכונות הפנימיות של רוחב-פס, צורתו, ושיטות הכימות המאפיינות אותם משפיעות על מדידות אלה. דיוק המכשיר, אם צוין, הינו אך ורק עבור תדירות שבתחום רוחב-הפס. מאחר ומתחי ה- EMG הנקלטים על פני האלקטרודות ממשטח העור מורכבים ממגוון תדרים המשתנה בכל רגע (ראה תרשים 4.10), רוחב הפס או צורתו (השונים ממכשיר למכשיר) ישפיעו על תוצאת המדידה המוצגות. (נושא זה נדון בפסקה "רעש פנימי: מסננים ורוחב-פס).

שיטת הכימות משפיעה על מדידת מכשיר ה –EMG. ראשית לכל, לא קיים בנמצא תקן כיול למכשירי מדידת אותות EMG. לחילופין נעשה הכיול באמצעות אותות מתח חילופין קבועי-משרעת הנקראים "גלי סינוס" הזמינים וקלים לשימוש.(תרשים 4.12 מדגים גל-סינוס שונה-משרעת). בהתאם לכך השימוש בגלי סינוס במקום באותות ה-EMG עצמם משמש כבסיס הדיון להלן.

" במיקרו-וולט פסגה לפסגה" מתייחס להפרש המתחים בין הפסגות החיוביות לפסגות השליליות של גל הסינוס של מתח החילופין הלא מיושר. כימות המבוסס על שיטת "מיצוע" כרוך בדרך כלל ביישור, החלקה, והצגה עיתית (מדי רגע ברגע) על גבי שעון, או סכימה וחלוקה בזמן כפי שתואר במפורט לעיל. המתח ה"ממוצע" של גל סינוס לאחר יישור כפי שהוא מוצג בשעון המדידה הוא גבוה מעט משליש הערך של "פסגה לפסגה". במהופך, הערך "פסגה לפסגה" קטן קצת פחות מפי שלוש מערך המתח ה"ממוצע". כמה ממכשירי ה- EMG המוקדמים מדדו את עוצמה (משרעת) ממוצעת של EMG, אבל כוילו במיקרו-וולט פסגה לפסגה. הרבה מכשירי EMG עדיין נוהגים בשיטה זו כדי להיות עקביים. כדי להמיר את התוצאה מפסגה לפסגה לממוצע, יש לחלק ב – 3.14.

כימות בשיטת "שורש ממוצע הריבועים" (Route Mean Square, RMS) מצריך ביצוע אלקטרוני של חישובים מתמטיים בצד גרסת החילופין או הגרסה הישרה של אות ה-EMG המסונן כדי שהמתח הנמדד יתקבל כשורש ממוצע הרבועים (RMS). כימות RMS נחוץ כדי לדעת מה הכוח החשמלי, בניגוד למתח המועבר על ידי האות. נתון זה אינו שמושי בדרך כלל לצרכי ביו-פידבק. ערכי RMS ל EMG הם כ- 20% מערך המתח הממוצע.

ההבדלים המעשיים בין שיטות כימות אלה או תנועת המחוון המד המתח הם זניחים – רק סקאלת המדידה על פני השעון משתנה. בכל מקרה, כדאי למשתמשים במכשיר EMG להכיר את טווח הערכים המתקבלים בתנאי מדידה שונים ולהיזהר בהשוואה של תוצאות המתקבלות במיקרו-וולטים ממכשירים בעלי מפרטים שונים.

חשובה מכל בנושא זה היא העובדה שלמרות שמכשירי EMG הם מדי מתח חילופין, מדידת EMG אינה מבוססת על אף סקאלה תקנית של כיווץ שריר. בין המכשירים קיימת שונות ואין הקבלה מכוילת תקנית בין מיקרו-וולטים של EMG לכיווץ שריר. ובאנאלוגיה לצורך המחשה: הוראת EMG היא לכיווץ שריר כמו שהוראת המדידה של מד-החום A בתרשים 4.1 היא לטמפרטורה. למרות שמדידות ה-EMG הן מידות מתח, הן לא באמת מידות של כיווץ שריר.

ספים (Thresholds)

בקרת ספים מאפשרת למשתמש להגדיר רמה מסוימת של EMG כמדד לביטוי מסוים של פידבק. למשל, ניתן להגדיר סף תחתון שרק מעליו יתחיל להתקבל פידבק-קולי. פידבק חזותי כגון אור או קו מתאר יכול להתריע כאשר רמת ה- EMG עוברת מעל או מתחת לרמת הסף המוגדר. עם ההתקדמות במהלך התרגול יעודכנו הספים בהתאם לשינוי המטרה.

אופני פעולה נוספים שלביו-פידבק

העוצמה המוחלקת של ה- EMG יכולה לשמש לתפעול כמעט כל שיטת פידבק כולל אור, קול, מתקן, מחשבים, או מכשירי פידבק מבוססי חישה. כל צורות הפידבק הן דרכים להמרת עצמת EMG למידע בעל משמעות או תוצאות. הבחירה באופן מסוים תלויה בדרישות היישום והמשתמש בביו-פידבק. למרות הפיתוי של פיתוח שיטות חדשניות ומורכבות, השיטות הטובות ביותר ליישום נתון הן דווקא אלה שמצליחות להציג את המידע או התוצאות תוך הפרעה מזערית וללא ערפול. פידבק פשוט ומתוכנן היטב בדרך כלל משיג מטרה זו. העוסקים במקצוע מסתפקים לעתים קרובות במספר מצומצם של אופני פעולה פרקטיים.

בטיחות

ציוד EMG מופעל על ידי חיבור חשמלי ישיר למטופל באמצעות אלקטרודות המונחות על פני העור, היוצרות נתיב למעבר אותות הביו-פידבק בין האדם למכשיר. למרות שהנתיב מיועד למעבר אותות ביו-פידבק, חשמל ממקורות אחרים יכול גם הוא לעשות שימוש בנתיב זה בתנאים מסוימים. הנוכחות של זרמים אחרים בנתיב האות מהווה סיכון. כתוצאה מכך וכדי למזער את סכנת החשיפה של מטופלים לזרמי חשמל חיצוניים, מוקדש מאמץ רב בתכנון וייצור מכשירים ביו-רפואיים מהשורה הראשונה. חרף עובדה זו אין מכשיר, יהא תכנונו וייצורו הטוב ביותר, אשר מחוסן ב 100% מפני סכנות התחשמלות בכל עת.

הסיכוי לתקלות חשמליות מסוכנות הוא קטן, במיוחד במכשירים הפועלים על סוללות, אבל אופן ההתקנה ורמת האחזקה של המכשיר חשובים לבטיחות המשתמש לא פחות מתקפות תכנונו. לפיכך מתפקידו ואחריותו של כל עוסק בתחום המשתמש במכשירים להיות מודע לסיכונים הכרוכים ולנקוט בכל אמצעי הזהירות הנהוגים בהתקנה, שימוש, ואחזקה של הציוד. בכל מקרה של אי-בהירות באשר לתפקוד מכשיר מסוים על העוסק לפנות ליצרן הציוד או מהנדס רפואי מוסמך. ***נושא זה חשוב במיוחד כאשר קיימים מספר מכשירים או חיבור למכשירים או עזרים המוזנים ישירות (בחוט) מרשת החשמל.***

כלל אצבע טוב הוא להטיל ספק בבטיחות של כל התקנה הכרוכה במכשירי עזר המופעלים על ידי חשמל (באמצעות חוטים) עד שבטיותם מוכחת בוודאות. הסיבה לכך היא שהתוצאות האפשריות של דליפת זרם מחוט החשמל עלולות להיות חמורות מאד. למשל די בזרם של 0.009 אמפר (9 מילי-אמפר) או פחות כדי למנוע מאדם לשחרר אחיזתו מהחפץ המחשמל. יכולת הנשימה עלולה להיפגע מזרם של כ- 18 מילי-אמפר, ופרפור לב (קטלני) כתוצאה מזרם של 50 מילי-אמפר. זרמים אלה קטנים במאות מונים מעצמת הזרם הנדרשת כדי לשרוף נתיך במערכת החשמל הביתית, כך שהנתיכים אינם מהווים הגנה הולמת מפני סכנות אלה. להלן רשימה של אמצעי בטיחות שיש לנקוט, אשר חלקם דורשים ייעוץ של מהדס ביו-רפואי או טכנאי:

1. יש לבצע בדיקות תקינות ובטיחות חשמלית תקופתיות לכל ציוד עזר המחובר ישירות לרשת החשמל ולאשרו לשימוש על ידי טכנאי ביו-רפואי.
2. יש להקפיד על טווח בטיחות שימנע ממטופל או כל אדם אחר מגע עם חלקי מבנה מתכתיים כגון רדיאטורים או צנרת.
3. יש להקפיד על הארקה תקינה של כל הציוד. להשתמש ב- "ממסר פחת" - המנתק אוטומטית את מתקן החשמל ממקור הזינה, במקרה של הופעת זרם דלף במתקן. עקרון הפעולה של המכשיר מתבסס על מדידת ההפרש בין הזרם המגיע למכשיר, לבין הזרם החוזר ממנו, אם יש הפרש והזרם המגיע נמוך

יותר, משמעות הדבר הוא דליפת הזרם דרך מקום אחר (אדמה או גוף האדם), ואז הוא מנתק את הזרם, בהתאם לרמת הרגישות שלו (למשל כאשר הפרש הזרם גדול מ 5 מילי-אמפר).

טיפול בתקלות באמצעות "נבדק דמה"

מעגלי EMG איכותיים הם בדרך כלל אמינים למדי, אך אלקטרודות , כבלים, וסוללות של ציוד הנמצא בשימוש רב עשויים להצריך טיפול תכוף. אבחון תקלות ברכיבים אלה הוא פשוט על פי רוב, ומצריך אמצעים מועטים בלבד.

אלקטרודות פגומות או חיבור פגום של אלקטרודה גורם למדידות גבוהות באורח לא צפוי. טוב יעשה המשתמש אם ימלא בקפדנות אחר הוראות היצרן לתחזוקת האלקטרודות ותפעול היישום. במקרה של תוצאות נצפות הגבוהות מהסביר, כדאי לוודא אם מקור הבעיה באלקטרודות, המגעים, הכבלים, או מכשיר ה- EMG עצמו. במקרה זה כדאי להשתמש ב"נבדק דמה" שאינו אלא שני נגדים אותם ניתן לחבר לכבל במקום האלקטרודות הסטנדרטיות. החיבור שלהם יוצר סימולציה לנבדק עם אפס EMG (ראה תרשים 4.17).

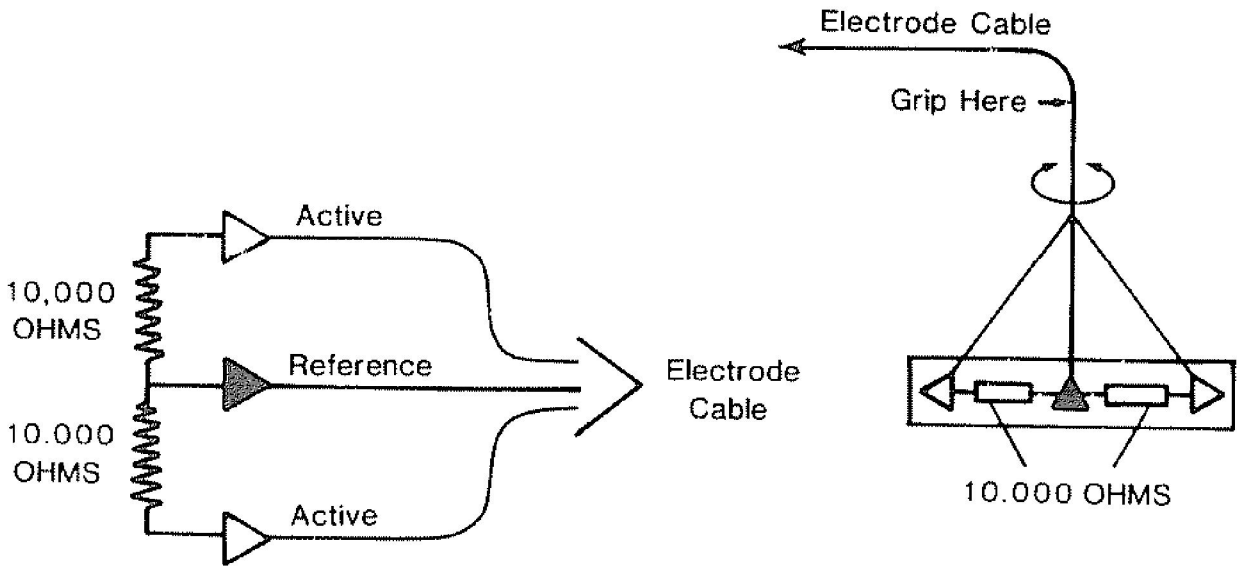
נבדק הדמה מספק בערך אותה רמת "התנגדות כניסה" שמעבירות אלקטרודות רגילות מפני העור, אלא שהוא לא מחולל כל אות EMG. לפיכך כאשר מחברים נבדק דמה, התוצאה צריכה להיות בקירוב לרעש השיורי של המכשיר כפי שהוגדר במפרט שלו. לשם ביצוע מבחן הוגן, יש לאחוז בכבל האלקטרודות בין האצבעות לפחות 30 ס"מ מנבדק הדמה המשתלשל לכיוון הרצפה. מרחק זה מונע מרעש עודף לעבור מגוף המשתמש לנבדק הדמה. תוצאת מדידת ה-EMG משתנה בדרך כלל בהתאם לתנועת הכבל בין אצבעות המשתמש, ממש כמו שאיכות קליטת טלוויזיה משתנה עם תזוזת האנטנה.

תוצאות גבוהות במיוחד הן על פי רוב אינדיקציה לרעש עודף (כלומר מעבר ליכולת ההנחתה של המגבר הדיפרנציאלי והמסננים) שמקורו בציוד חשמלי הנמצא בסביבה, או קלקול בכבל האלקטרודות או מכשיר ה-EMG. אם מבחן נבדק הדמה באזור בו מצוי המטופל מראה תוצאה הדומה בקירוב לרעש השיורי כפי שמופיע במפרט המכשיר, ניתן לומר בביטחון שרעשי הרקע בסביבה אינם חזקים מדי. משמעות הדבר היא שתוצאות גבוהות מבדיקת המטופל האמיתי אינם בשל כשל מכשיר ה-EMG או כבל האלקטרודה. במקרה זה קרוב לודאי שהאשם הוא באלקטרודות או במגעי האלקטרודות.

אם התוצאה גבוהה מאד ונשארת כזו גם כאשר מסובבים את נבדק הדמה יש קרוב לודאי נתק בכבל האלקטרודות. ניתן לאשש השערה זו על ידי החלפת הכבל. אם התוצאה לא משתנה גם לאחר החלפת הכבל, הכשל הוא קרוב לודאי במכשיר ה-EMG עצמו, או שאזור הטיפול רווי ברעשי רקע חשמליים. ניתן לבחון השערה זו על ידי העתקת המכשיר למקומות שונים וחזרה על מבחן נבדק הדמה.

אם מבחן הדמה מראה שהמכשיר והכבל פועלים כשורה, אבל התוצאה נשארת גבוהה במיוחד נסה להסיר את אלקטרודות , לנקות את משטח העור, ולחברן מחדש.

כדאי למשתמשים במכשיר לערוך מבחני דמה אם עוד לא בצעו כאלה, ולנסות אותם כשיודעים בוודאות שהמכשיר והכבלים פועלים כשורה. התנסות זו תסייע להם לפרש נכון תוצאות מדידה כאשר אכן יקרו תקלות.



תרשים 4.17 נבדק דמה.

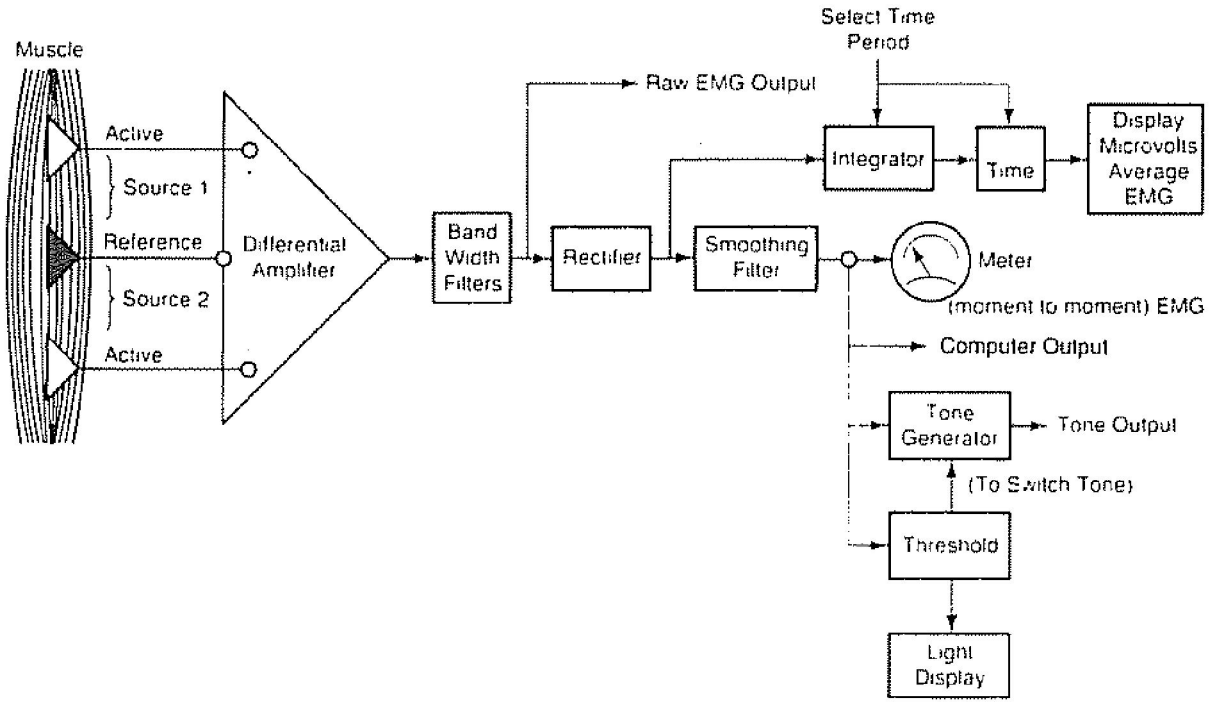
כשל סוללות

תוצאות גבוהות או נמוכות במידה שאינה רגילה יכולות להצביע על כשל סוללות. רוב המכשירים מצוידים במד תקינות סוללות אינטגראלי. השתמש בו בכל מקרה שיש ספק בדיוק תוצאות המדידה. מכשירים שאינם מצוידים בבודק סוללה, כוללים הנחיות לבדיקת סוללה במדריך למשתמש המגיע אתם.

סוללות מזדקנות עלולות לעבור את הבדיקה ולתפקד כראוי בשלב מוקדם של הטיפול, להיחלש במהלך הטיפול, ולבסוף ל"התחדש בעצמן" לאחר כמה שעות הפסקה. זמן הכשירות שלהן לאחר "ההתחדשות העצמית" מתקצר והולך עד שהסוללות אינן יכולות לספק את הכוח הנדרש להפעלת המכשיר בכלל.

סיכום

דיאגראמה סכמטית של מכשיר EMG היפותטי עם מספר פלטים מוצגת בתרשים 4.18



תרשים 4.18 דיאגראמה סכמטית של מכשיר EMG היפותטי עם מספר פלטים.

תפעול מכשיר ביו-פידבק מבוסס טמפרטורה

מכשירי ביו-פידבק מבוססי טמפרטורה מודדים שינויי חום של העור. טמפרטורת העור היא משמעותית שכן היא קשורה למערכת העירור הסימפתטית: עירור סימפתטי משפיע על היצרות כלי דם פריפריאליים. היצרות כלי דם פריפריאליים משפיעה על זרימת הדם, במיוחד בקצוות הגוף כגון אצבעות הידיים ובהונות הרגליים. זרימת הדם משפיעה על טמפרטורת העור. עירור סימפתטי מאופיין על פי רוב בהגברת תופעת היצרות כלי הדם הפריפריאליים, המובילה להקטנת נפח הדם ולפיכך לאפקט של התקררות העור.

למרות שתופעה זו של מערכות העצבים וכלי הדם כרוכה בהיצרות ודילול כלי הדם, משמעות המונח "היצרות כלי דם פריפריאליים" בהקשר הנוכחי כוללת כל שינוי של הקף כלי הדם הפריפריאליים. כך למשל, היצרות מופחתת של כלי הדם הפריפריאליים היא הביטוי כאן להרחבת כלי דם.

תפקידי מכשיר ביו-פידבק מבוסס טמפרטורה הם כדלקמן:

1. לאפשר לעור לחמם מכשיר הרגיש לשינויי חום.
2. לשמש כ"שסתום" חשמלי רגיש לטמפרטורה, היכול לווסת זרם המגיע למכשיר דרך חיישן חשמל.
3. להמיר שינויי של זרם חשמלי תלויי טמפרטורה העובר דרך המכשיר לטמפרטורה המוצגת במעלות ומספקת מידע פידבק משמעותי נוסף למשתמש.

לאפשר לעור לחמם מכשיר

מכשיר אופייני למדידת חום עשוי מאחת או יותר פיסות חומר חשמלי רגיש לחום (הנקראות "נגד רגיש-חום" או "תרמיסטור") עטופות החומר מבודד חשמל עם חווט חשמלי היוצא מהן לצורך חיבור ליחידת מדידת החום. התקן למדידת טמפרטורה אינו אלקטרודה. הוא מיועד אך ורק ליצירת מגע תרמי, לא חשמלי, עם העור. ההתקן קולט רק חום מהעור ושומר על טמפרטורה זהה לזו של העור שמתחתיו. בדרך כלל מוצמד ההתקן באמצעות סרט דביק

או מהודק בקשר לעור. כאשר העור מתחמם או מתקרר, ההתקן מתחמם ומתקרר אף הוא בהתאמה, אף כי בהפרש זמן קטן משום שלטמפרטורת ההתקן נדרש מעט זמן ל"השיג" את טמפרטורת העור.
ההתקן מוצמד לצד כלשהו של כל אחת מהאצבעות. ברם נדרשת עקביות בין כל המדידות (מפגשי טיפול) משום שמידת החום או זמן התגובה עשוי להשתנות מאתר מדידה אחד למשנהו. צד הגב של האצבעות הוא אתר נפוץ. הוא מאפשר לנבדק להניח את היד על הכסא או על הרגליים בלי לגרום לחימום ההתקן באזור שבין האצבע לכסא או הגוף. יתרה מכך, על משטח גב האצבע ישנן פחות בלוטות זעה, כך שצינון באמצעות נידוף קורה במידה פחותה. ניתן לבחור באתרים אחרים למדידה כמובן. ואולם ישנה חשיבות רבה יותר לעקביות מאשר לבחירת אתר אצבע ספציפי כזה או אחר.

ההתקן כשסתום חשמלי רגיש-חום

הנגדים רגישי-החום של ההתקן מתפקדים כ"שסתום" בפני החשמל המועבר אליהם מהמכשיר. בהקבלה דומה תפקודם לזה של שסתום מים הנסגר ונפתח בהדרגה כדי לווסת את זרימת המים. אלא שבמקרה זה, טמפרטורת ההתקן מפעילה את ה"שסתום" ומווסתת את זרם החשמל. כאשר ההתקן מתחמם, יורדת התנגדותו החשמלית, והוא מאפשר זרימה רבה יותר של חשמל דרכו. כאשר הוא מתקרר, עולה התנגדותו (ה"שסתום" נסגר קמעה), ופחות זרם עובר דרכו. באופן זה נקלטת טמפרטורת ההתקן כתנודות בזרם החשמל העובר בהתקן.

הצגת הטמפרטורה ופידבק אחר

מכשיר הטמפרטורה מודד את זרימת החשמל דרך ההתקן ומציג כמות זן (בקנה מידה נאות) כמעלות או פידבק אחר.

אופן פעולת המכשיר

מכשירי פידבק מבוססי חום יכולים לבצע את תפקידם ביותר מאופן אחד. שימוש נבון בביו-פידבק מבוסס חום לא מצריך ידע רב בהבנת אופן הפעולה הפנימי של המכשיר. למרות זאת, יש חשיבות להבנה של עקרונות הפעולה המשותפים לכל מכשירי הביו-פידבק המבוססים על חום.

חוק אוהם

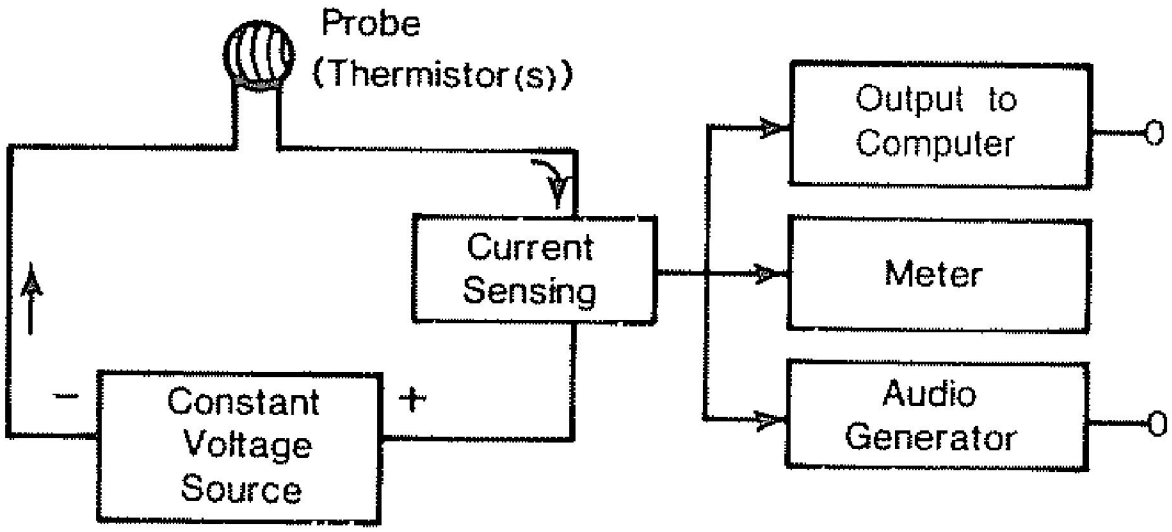
מכשירי פידבק מבוססי חום פועלים על סמך נגזרת כזו או אחרת של חוק אוהם. ג'ורג' אוהם היה מדען מבווארייה אשר הגדיר ב 1827 את הקשר הכמותי בין שלושה גורמים בסיסיים של מעגלים חשמליים: מתח, התנגדות, וזרם. ב 1891 הגדיר הקונגרס החשמלי בפאריס שמתח חשמלי יוגדר בוולטים, על שם וולטה האיטלקי, עצמת זרם חשמלי באמפר על שם אמפר הצרפתי, והתנגדות באוהם, על של אוהם הגרמני. מאחר וקימת היראולית נוחה לחוק אוהם, מוצגים החוק וההקבלה ביחד בטבלה 4.2.

חוק אוהם ומתקן הפידבק מבוסס החום

חוק אוהם קובע שכמות הזרם הזורם במעגל חשמלי המופעל על ידי מתח קבוע תלויה ישירות בהתנגדות המעגל. התנגדות הנגד התרמי משתנה עם שינוי הטמפרטורה. לפיכך, כאשר נגד תרמי הוא גורם ההתנגדות היחיד במעגל בעל מתח קבוע, עוצמת הזרם במעגל פרופורציונית לטמפרטורת נגד החום. היחס הכמותי בין הטמפרטורה והתנגדות נגד החום היא תכונה של נגד החום ומשתנה מהותית בין דגמים שונים. מסיבה זו דגמי התקנים אינם חלופיים על פי רוב. מעגל חישת זרם ראוי ושעון מידה מציגים תוצאת מדידה במעלות. תרשים 4.19 מראה מכשיר היפותטי של פידבק מבוסס חום.

טבלה 4.2 חוק אוהם: מתח, התנגדות, וזרם.

חוק חשמלי		הקבלה הידראולית
וולט: יחידת מתח (לחץ) חשמלי אמפר:יחידת זרם חשמלי אוהם: יחידת התנגדות חשמלית	יחידות	**פאונד לאינץ' מרובע:יחידת לחץ מים** **גלונים לדקה: יחידת זרימת מים** **אין יחידה להגדרת התנגדות לזרימת מים**
מתח(בוולט) דוחף את הזרם (באמפר) דרך התנגדות (באוהם) במעגל	תאור המעגל	**לחץ (בפאונד לאינץ' מרובע) דוחף את זרם המים (בגלונים לדקה) דרך התנגדות הצנורות**
זרם = מתח/התנגדות או, אמפר = וולט/אוהם (חוק אוהם)	כימות	
וולט = אמפר X אוהם אוהם = וולט/אמפר	משוואות אלגבריות	
מתח (וולטאג'): V או E זרם: I התנגדות:R	סימונים מוסכמים	



תרשים 4.19 מכשיר היפותטי של פידבק מבוסס חום.

פרמטרים של מכשירי פידבק מבוססי חום: השונות בין מכשירים שונים

קיים מגוון רחב של מכשירי פידבק מבוססי חום השונים בביצועיהם, עלותם, החל בכאלה המכונים בצדק "מכשירים" וכלה בכמה שהם יותר "גיזמו" (פטנטים) ממכשיר אמיתי. שלשת הפרמטרים הבאים – זמן תגובה, דיוק מוחלט, ורזולוציה, יכולים לשמש כבסיס להשוואת ביצועים של מכשירי פידבק מבוססי חום.

זמן תגובה

"זמן תגובה" הוא בעיקר תכונה של ההתקן, המעיד על מהירות התגובה שלו לשינוי טמפרטורת העור. אם התגובה מהירה, העיכוב בהיזון החוזר מינימלי. גם שינויים קטנים בטמפרטורה נראים בבירור. ברם זמן תגובה מהיר מושג בדרך כלל על חשבון עלות גבוהה יותר ושבירות (עדינות) של המכשיר. התקן מהיר תגובה (למשל 0.3 שנייה) הוא קטן מאד וקל משקל, עטוף בחומר בעל מוליכות חום גבוהה, כך שהוא מעביר את שינויי החום כמעט בו זמנית עם השתנותם על פני העור. התקנים כאלה הם עדינים ויקרים לייצור. התקנים גדולים ומגושמים יותר הם זולים ועמידים יותר, אבל צורכים זמן רב יותר להעברת שינויי הטמפרטורה מהעור למכשיר.

התקן מהיר תגובה אינו נחשב הכרחי עבור רוב היישומים. כדי להבין מדוע, נזכור שחשיבות טמפרטורת העור היא משום שהיא מספקת גישה עקיפה להיצרות כלי דם פריפריאליים. בלווא-הכי קיים כבר פער משמעותי בזמן שחלף משינוי הקף כלי הדם ועד לשינוי טמפרטורת העור כתוצאה ממנו. זמן תגובת ההתקן רק מעמיק את הפיגור הכללי בין האירוע המקורי של כלי הדם לאירוע המשני של שינוי טמפרטורת העור. אפשר לטעון שדווקא בגלל פיגורים אלה ישנה חשיבות רבה להקטין את פיגור ההתקן למינימום האפשרי. מאידך גיסא שינוי טמפרטורת העור הוא תופעה איטית ביחס, ולפיכך זמן תגובה מהיר לא מוסיף ערך רב ליישומי הרפיה. אף אחת מהטענות אינה עדיפה בעליל. ישנן עדויות לטיפול מוצלח בביו-פידבק מבוסס טמפרטורה תוך שימוש במגוון רחב של התקנים בעלי זמני תגובה שונים. חישובי "טעות מעקב" המבוססים על תנאים צפויים בביו-פידבק מראים שזמן תגובה של התקן מסדר גודל של שנייה אחת הוא, קרוב לוודאי, מספק.

דיוק מוחלט

"דיוק מוחלט" מתייחס להפרש בין הטמפרטורה המוצגת על שעון המדידה לבין הטמפרטורה האמיתית של ההתקן. כמעט כל מכשיר טמפרטורה יעקוב אחר שינויי הטמפרטורה (בפיגור מתאים לזמן התגובה שלו), אבל ישנה שונות רבה בין המכשירים באשר לדיוק הטמפרטורות הנמדדות. למרות שמכשיר נתון עשוי להגיב ברגישות רבה ל***שינויים*** בטמפרטורה, לא סביר שתוצאות המדידה תהיינה זהות בדיוק לטמפרטורה ה***אמיתית*** של ההתקן. לדוגמא, תיתכן תוצאה גבוהה או נמוכה במספר מעלות מהטמפרטורה האמיתית.

יתרה מכך, שתי יחידות זהות המודדות אותו אתר יציגו קרוב לודאי תוצאות שונות. שונות כזו במדידה המוחלטת היא צפויה, וטווח השגיאה למכשיר נתון מצוין בדרך כלל במפרט הנלווה לו. דיוק מוחלט של $1^{\circ}F \pm$ נחשב למספק. דיוק מוחלט הוא פשרה עם מרכיב העלות, שכן יכולת גבוהה של דיוק מוחלט נקנית ביוקר רב. היתרונות המעשיים של ציוד עם דיוק רב במדידת הטמפרטורה המוחלטת אינם ברורים לגבי ביו-פידבק קליני. פידבק מוצלח מתקיים תוך שימוש במכשירים עם רמות דיוק מוחלט שונות – כולל כאלה שאינם מכוילים כל לסקאלת פרנהייט. מכשירים אלה נותנים אינדיקציה לשינוי יחסי בלבד של התחממות או התקררות.

נושא הדיוק המוחלט מתעוררת לגבי ציוד ביו-פידבק מבוסס טמפרטורה בשל קיום סקאלות טמפרטורה תקניות (פרנהייט וצלסיוס) המספקות תקן מוחלט למדידת טמפרטורה. במהופך, נושא הדיוק המוחלט במדידת EMG הוא פחות רלוונטי, משום שאין סקאלת EMG תקנית כלשהי היכולה לשמש כמישור ייחוס בדומה לסקאלות הטמפרטורה התקניות. יש לזכור: למרות ש***טמפרטורה*** נמדדת בסקאלה תקנית, ***היצרות כלי דם פריפריאליים*** אינה נמדדת כך. מדידה מדויקת ביותר של טמפרטורה אינה בהכרח אומדן מדויק ביותר של היצרות כלי דם פריפריאליים, ועוד פחות מכך של עירור סימפתטי.

רזולוציה

"רזולוציה" מתייחסת לשינוי הטמפרטורה הקטן ביותר שהמכשיר מסוגל להבחין ולהציג. רזולוציה משפיע על גודל הפיגור של ההיזון החוזר. למשל, יחידה דיגיטלית הנמדדת בדיוק של $1^{\circ}F$ תציג משוב שהטמפרטורה השתנתה כאשר שינוי של $1^{\circ}F$ התרחש. מאחר והטמפרטורה משתנה לאורך זמן, ההיזון החוזר יפגר באותו משך שלוקח לטמפרטורה להתנות במעלה אחת F. רזולוציה של $0.1^{\circ}F$ תספק משוב מהיר בהרבה, שכן משך השמן הנדרש לשינוי ב - $0.1^{\circ}F$ קטן בהרבה מזה שנדרש לשינוי של $1^{\circ}F$. ניתן לבנות מכשירים המפרידים ב- $0.01^{\circ}F$, ולהם

כמובן זמן פיגור נמוך עוד יותר. למרות זאת, רזולוציה גבוהה מאד גם מגבירה את הסיכון של טעות בזיהוי המקור האמיתי לשינוי הטמפרטורה – בין המכשיר להיצרות כלי הדם הפריפריאליים. לצורך המחשה, תזוזה, משב רוח קל, והתקררות החדר ישפיעו קרוב לודאי יותר על תוצאות המדידה במכשיר עם רזולוציה גבוהה מאד מאשר על מכשיר עם רזולוציה גסה יותר. יתרה מכך, מכשיר בעל רזולוציה גבוהה חייב לעמוד בדרישות דיוק חמורות בהרבה, ובהתאם לכך עלותו גבוהה יותר. אם לא יעמוד בדרישות כאלה הוא עלול ליצור שיוני נראה בתוצאות ע"י "סחף" של מעגליו עצמו. יש סיכון גדול יותר שמכשיר בעל רזולוציה גבוהה במיוחד יסיח את הדעת על ידי הצגת מידע שגוי או הוספת מרכיבים מלאכותיים לאפקטים האמיתיים של היצרות כלי הדם הפריפריאליים. רזולוציה של 0.1˚ F נפוצה במכשירי טמפרטורה ונחשבת כערך מספק.

למשוב דיגיטלי ואנלוגי יכולת הפרדה שונות. לדוגמא, מד דיגיטלי של שלוש ספרות (עשרות, עשרות, ועשירויות) יכול להפריד עד ל 0.1˚ F. ברם, צליל (כדוגמת פידבק קולי המבוסס על "צליל קצוב" המתואר בפסקה הדנה ב-EMG) יכול להבחין בהבדלים דקים עוד יותר המתרחשים באינטרוול בין שינויי ספרות עשיריות היחידה במד הדיגיטלי.

גורמים(חיצוניים) לשגיאות מדידה

משום שהטמפרטורה החיצונית היא אינדקס עקיף להיצרות כלי דם פריפריאליים, ישנם מספר מקורות לשגיאות מדידה. כדי לאתר את הגורמים לשגיאת המידה יש לשאול: "אילו תנאים גרמו לשינוי טמפרטורה שאינו קשור לשינוי של היצרות כלי הדם?"

טמפרטורת חדר נמוכה

טמפרטורת האוויר בחדר בו נערכות המדידות עשויה להשפיע על תוצאת המדידה. למידה נתונה של היצרות כלי הדם, טמפרטורת העור עשויה להיות נמוכה יותר בחדר קריר מאשר בחדר חם פשוט מאחר והאוויר הקר סופג יותר חום מהעור. אויר קר עלול גם לקרר ישירות את ההתקן.

משב אויר

תנועת האוויר מחמירה את אפקט הקירור הנזכר לעיל בשני אופנים. האחד, משב אורי מסיר חום מפני העור מהר יותר מאשר אויר עומד. השני, משב אויר מאדה זעה מהר יותר מאשר אויר עומד.

טמפרטורת חדר גבוהה

נזכור שטמפרטורת החדר מציבה סף נמוך מקורב לטמפרטורת היד. כלומר, היד לא יכולה להתקרר הרבה מתחת לטמפרטורת האוויר שמסביבה. זאת משום שקירור מתרחש על ידי התפשטות חום מהיד לאוויר. ברגע שהיד מתקררת לטמפרטורת האוויר, אין יותר מקום לחום להתפשט. היד נותרת בטמפרטורה זו בקירוב ללא תלות בהיצרות נוספת של כלי הדם. ואולם, ייתכן שהעור יוכל להתקרר עוד מעט כתוצאה מאידוי זעה. אפקט האוויר החם אינו בעייתי על פי רוב משום שטמפרטורת החדר היא בדרך כלל בסביבות 72˚ F, קרוב לתחום התחתון של טווח טמפרטורת העור אצל רוב האנשים.למרות זאת, במקרה של חום חדר גבוה, טמפרטורת עור גבוהה יותר תצפה מאשר החדר קר יותר, אפילו עם מידה זהה של היצרות כלי דם. למשל ביצוע ביו-פידבק מבוסס חום בחדר של 90˚F יגרום לידיים חמות אצל כל האנשים, ללא תלות במידת היצרות כלי הדם שלהם. במקרה כזה, גם ליד של גויה, 'אין לה כל היצרות שהיא, תרשם מידת חום של 90˚F!

טמפרטורת החדר וטמפרטורת מכשיר הפידבק

גם אם טמפרטורת ההתקן נשארת קבועה, הטמפרטורה הנמדדת עשויה להשתנות עם התחממות או התקררות המכשיר ***עצמו***. זאת משום שרכיבים אלקטרוניים רגישים לטמפרטורה. כתוצאה מכך, רמת ביצועי המעגלים האלקטרוניים פגיעה לשינוי או "סחף" כאשר טמפרטורת הסביבה משתנית. זו תופעה ידועה ומתכנני מעגלים חשמליים בדרך כלל מפצים עליה בתוך המעגלים. "תיקוני טמפרטורה" כאלה הן בעלי חשיבות רבה למכשירי טמפרטורה, משום שהם נדרשים להבחין בשינויים קטנים והולכים בזרם החשמל המגיע מההתקן. אם תיקון הטמפרטורה אינו מושלם, אזי התוצאה הנמדדת משתנה קמעה כפונקציה של טמפרטורת החדר כמו גם

טמפרטורת העור. מקור טעות כזו והא בדרך כלל לא משמעותי מעשית אלא אם כן טמפרטורת החדר ידועה כמשתנה בטווח רחב מאד.

מגע ההתקן ו"מיסוך"

שינויים במגע ההתקן הנגרמים בשל תזוזה עשויים להשפיע על תוצאת המדידה של הטמפרטורה. אם ההתקן מתחיל להתרומם מן העור כאשר מושכים בחיבורים התוצאות תהיינה קרוב לוודאי נמוכות. תופעה הפוכה קורית כאשר ההתקן מכוסה על ידי יד, בגד, או אפילו החומר המצמיד אותו לגוף, לכולם אותו אפקט של "מיסוך" ההתקן.

צינה

אם המטופל מגיע כשטמפרטורת גופו צוננת בשל קור הסביבה החיצונית, סביר להניח שידיו יהיו צוננות גם כן. יש לחכות עד שהמטופל יחזור לטמפרטורה נורמאלית. אחרת המנגנון הטבעי של הגוף להיצרות כלי הדם הפריפריאליים בתנאי קור לצורך שימור חום האברים הפנימיים ישפיע משמעותית על תוצאות הביו-פידבק במפגש המדובר. גם לאדם שטמפרטורת גופו לא צוננת אבל הוא מגיע למפגש עם ידיים קרות צריך לאפשר להגיע לטמפרטורת עור יציבה טרם תחילת התרגול. אחרת ההפשרה הטבעית של הידים שנחשפו קודם לכן לקור תזוהה בטעות כאפקט של התרגול.

בדיקת דיוק מוחלט

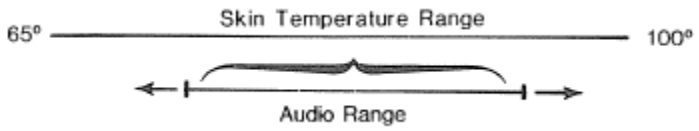
ניתן לבצע בדיקת דיוק מוחלט של מכשירי מד החום על ידי טבילת ההתקן בכוס מים בצד מד-חום מעבדה בעל דיוק סופי ידוע, ובחישה של המים לאחר מכן. לאחר התייצבות המכשירים ניתן להשוות בין התוצאות. בדיקה כזו נדרשת במקרה שדיוק המכשיר או ההתקן שלו מוטלים בספק, או כאשר רוצים לוודא ששני התקנים זהים לכאורה אכן זהים גם למעשה. אם התהליך מבוצע בקפידה ניתן להשתמש בו כדי לזהות סטיית טמפרטורה של המכשיר עצמו. כאשר ההתקן טובל בכוס מים, חמם או קרר את המכשיר תוך שימת לב לשינויי תצוגת הטמפרטורה על גבי הצג. לצורכי בדיקה זו יש לוודא שטמפרטורת המים בכוס נשארת קבועה, ולשם כך ניתן להשתמש בתרמוס.

פידבק אחר

פידבק קולי

מכשירי מדידה דיגיטליים משמשים לעתים קרובות ביישומים של פידבק ויזואלי בשל יכולת הפרדה (הבחנה) טובה בשינויים קטנים בטווח רחב מאד. צלילים אינם יכולים לספק אותה רזולוציה על פני טווח רחב כל כך. אם היינו מפזרים בפשטות את טווח הצלילים האפשרי על פני תחום מדידת טמפרטורת העור, אנשים בעלי חום נמוך או גבוה במיוחד של העור יאלצו לקבל פידבק בצלילים הנמצאים בקצוות הסקאלה האפשרית. הקשבה לצלילים כאלה במשך זמן ארוך אינה אפשרית. יתרה מכך, שינויים קטנים מאד בטמפרטורה ייגרמו בהתאם לשינויים קטנים בצליל הפידבק. פתרון טוב לבעיה זו הוא להניח לנבדק להעתיק את כל הטווח הקולי למעלה או למטה על פני תחום הטמפרטורות, כך שפידבק קולי של צלילים בטווח שמיעה נוח יתאפשר עבור כל טמפרטורת עור אמיתית. תרשים 4.20 מציג זאת בצורה גרפית. העתקת הטווח הקולי מושגת על ידי שימוש בכפתור בקרה המשפיע על גובה הצליל המוצג, אך לא על התוצאה עצמה. כך יכול המטופל לכוון את הפידבק הקולי לתחום צלילים לפי נוחותו סביב כל טמפרטורה שיחפוץ.

מספר מדי טמפרטורה מצוידים בבקרת "שיפוע" המאפשרת למשתמש לבחור אם עליית הטמפרטורה תאופיין עליה או ירידה בגובה הצליל. יש בכך כדי לעודד את המשתמש להתאים את הפידבק הקולי למה שהם רואים כהתחממות. לדוגמא, ישנם משתמשים החשים שעליית צליל היא הביטוי הטבעי ההולם לעליה בטמפרטורה, שכן היא מתאימה לאופן בו הם מדמיינים את זרימת הדם בכלי הדם העוברים באצבעות. אחרים מוצאים שצליל יורד הוא סמן טבעי יותר להרפיה.



תרשים 4.20 תחום פידבק קולי ניתן להעתקה על פני תחום טמפרטורת העור.

פידבק נגזר (Derivative)

פידבק "נגזר" מצוי לפעמים במדי טמפרטורה. "נגזרת" היא ביטוי מתמטי המבטא את שיעור השנוי. במד טמפרטורה הוא מתבטא כאור או קול המופעל כאשר טמפרטורת העור משתנה בשיעור מסוים. למשל, מנורה אדומה נדלקת כאשר טמפרטורת היד של המטופל עולה בשיעור של מעלה אחת פרנהייט או יותר. מנורה אחרת נדלקת או קול נשמע אם טמפרטורת היד הייתה נופלת בשיעור דומה. כך נוצר שיעור מטרה לחימום היד, והוא מאפשר סיכום כמותי כדוגמת אחוז הזמן מעבר לשיעור המטרה שהוגדר לעיל.

בטיחות

ציוד ביו-פידבק מבוסס טמפרטורה לא עושה שימוש באלקטרודות, ולפיכך אינו מציב למשתמש בעיות של סכנת התחשמלות אפשרית כמו ציוד ה EMG. מכיוון שההתקן מבודד חשמלית במתכוון מהנבדק, הסיכוי לתקלה חשמלית שתקרה נמוך מזה הקיים בשימוש ב-EMG. למרות זאת, מכשירים אלה מצריכים נקיטת אמצעי זהירות בשומה לאלה שהוזכרו בדיון במכשירי ה-EMG. אם, למשל, התקן מתקלקל (בעצמו או כתוצאה מחשיפת הבידוד או קרע בחיווט), כך שהוא לא מבודד יותר מן העור, הוא הופך למעשה לאלקטרודה. או אז גובר הסיכון של התחשמלות או דליפות זרם, במיוחד לאור העובדה שההתקנים אינם מיועדים לפעול באופן בטיחותי בתנאים אלה. לפיכך, וכדי להיות בטוחים מעבר לכל ספק, יש למלא אחר הוראות הבטיחות של מכשירי EMG. ***יותר מכך, יש להתייחס להוראות הבטיחות כמחייבות לכל התקנת ביו-פידבק, ולא רק למכשירים מסוימים המשתתפים בהתקנה.***

ביופידבק אלקטרו-דרמי (Electrodermal)

סקירה היסטורית של מחקר אלקטרו-דרמי

ההיסטוריה המוקדמת של מחקר אלקטרו-דרמי היא סיפור מעניין המובא בידי Neumann & Blanton (Neumann & Blanton, 1970) . הם מתחילים את הסיפור בגילוי התהליכים החשמליים בפעולות שריר-עצב על ידי גלווני (Galvani), אשר עוררה מיד מחקר בתחום יישומים רפואיים של חשמל. כבר ב-1840, רווחה האמונה שתהליכים חשמליים יכולים להסביר מחלות ולשמש לצורכי אבחון וטיפול. המחברים מעירים שאמונה זו הייתה עקבית עם החשיבה פיזיקליסטית של התקופה, בתגובה לחשיבה הויטליסטית ששררה בעידנים שקדמו לכך. עד 1870, מכשור ותהליכים מתוחכמים יחסית לתקופתם התפתחו כחלק ממתודולוגית המחקר הפיזיולוגי-חשמלי. (אוסף מרהיב של ספרות ומכשור כאלה קיימים ב – Bakken Museum of Electricity in Life במיניאפוליס שבמינסוטה ארה"ב).

עם התפתחות התחום, גילו החוקרים שהתנגדות העור משתנית באתרים שונים בגוף. מכיוון שהמחקר התמקד בהשפעות הפיזיקאליות של זרמי החשמל והשדות הסטטיים, החוקרים המוקדמים הבחינו ששינויים בהתנגדות העור הובילו לשינויים בעצמת הזרימה דרך הגוף, ולפיכך הם נטו לראות בשנויי ההתנגדות האלה תופעת לוואי חיצונית הנובעת מהתהליך. המכשירים שנבנו תוכננו במיוחד כל שיוכלו לצמצם את התופעה הזו. רוב החוקרים המשיכו לראות בהתנגדות העור תופעת לוואי של תהליכי אבחון או טיפול באמצעות זרם חשמלי או שדות סטטיים.

ואולם ב-1879, Romain Vigouroux מדד התנגדות עור כמשתנה ניסיוני במקרים של Hysterical Anesthesias. זו, לפי Neumann & Blanton התצפית הראשונה שקשרה גורמים פסיכולוגיים לתופעה האלקטרו-דרמית. ב -1988, Charles Fere , עמית של Vigouroux, חקר את השפעת העירור הפיזי על התנגדות העור וגילה עלייה בעוצמת הזרימה בעקבות עירור. זו, על פי כותבי המאמר, הייתה הפעם הראשונה של מה שנקרא ב – 1915 תגובת עור גלוונית (Galvanic Skin Response- GSR), וזו קרוב לודאי ההצגה הראשונה של תאוריית העירור.

ראוי לציין שעוד בתקופת Fere, פיתח הפיזיקאי הצרפתי אלקטרודות בלתי ניתנות לקיטוב מכסף- כלורידי (silver chloride nonpolarizable electrodes) לצרכי מחקר פיזיולוגי, כמו גם כגלוונומטר משוכלל (מד-מחוון), חלוץ של זרם מדים מודרניים שעדיין קרויים על שמו. החוקר הגרמני הרמן קישר GSR עם פעילות בלוטות הזעה ב- 1881 ובכך מיסד את הבסיס הפיזיולוגי לתופעה. ב- 1889, החוקר הרוסי איבן טרחנוף, בעודו חוקר מתחי עור, הראה שלא רק גירוי פיזי אלא גם פעילות מנטאלית (כמו חישובים אריתמטיים בראש והיזכרות באירועים מטרידים) הביאו לשינויי מתח על פני העור. יתרה מכך הוא קישר תופעה זו לפיזור בלוות הזעה וטען שהוא קשור לפעולת "עצבי-הפרשה". Neumann & Blanton מדווחים שהדוחות של טרחנוף ו- Fere קדמו ל"שנים מספר של שכחה". GSR התגלה ב-1904 .

באותו זמן, מהנדס שוויצרי בשם E.K. Mueller הבחין שהתנגדות העור משתנה עם אירועים פסיכולוגיים. הוא הראה את ממצאיו לנוירולוג השוויצי Veraguth, ושניהם סברו שגילו תופעה חדשה. Mueller המשיך בתפקיד מומחה פסיכולוגי והביא לשיפורים בתחום הבעיות הטכניות של מדידה, מהימנות בתכנון האלקטרודות, וניסויים בשימוש בזרם חילופין. עד 1905 Veraguth הספיק לבצע מספר ניסויים ראשוניים כאשר גילה למבוכתו את עבודתם הקודמת של טרחנוף ואחרים.

Veraguth וקרל יונג היו חברים, ובאופן כלשהו (כל אחד טוען שהציע זאת לחברו) שימש GSR בניסויי אסוציאציות מלים שערך יונג. עקב זאת סיפק יונג את הדחיפה העיקרית למחקרים נוספים בתחום זה. ב- 1907 הוא החשיב GSR, ש Veraguth ויונג כינו "רפלקס פסיכו-גלווני", כאמצעי להמחשה של "טונים של רגשות" שנחשבו נסתרים עד אז. יונג החל בניסויים מקיפים וייצא את רעיונותיו לידידים בארה"ב. Neumann & Blanton מדווחים ש"זרם" של מאמרים הופיעו בשני העשורים הבאים ובססו את התחום כתחום מחקר עיקרי. מאז, GSR הוכר כדרך גישה אובייקטיבית לעירור פסיכו-פיזיולוגי.

משתנה פיזיולוגי זה הופיע באינספור ניסויים פסיכולוגיים, בפרקטיקה קלינית, בציוד "פוליגרף", ואפילו בצעצועים ומשחקי סלון. ביו-פידבק משתמש בו לצורכי גישה לעירור המערכת האוטונומית. התנגדות העור מוכרת כרגישה במיוחד למצבי ביניים רגשיים ואירועים מנטאליים, ובו בזמן נותרת פחות או יותר משוחררת ממדדים אחרים של ביו-פידבק כגון מתח שרירים וטמפרטורת העור. זהו משתנה מורכב, רגיש לתחום רחב של פעילויות גלויות ונסתרות, וגירוי פנימי וחיצוני. רגישותו לתוכן פסיכולוגי במצבים אמיתיים או בתנאי מעבדה של מצבים אנושיים הביאו כנראה את ברברה בראון (1974) לכנות GSR "שיח עור" ("skin talk"). זו מטאפורה הולמת שעושה צדק לתגובה הפסיכולוגית שלו ובו בזמן נותנת לגיטימציה לוריאציות המורכבות לעתים והלא צפויות לכאורה ולהבדלים האישיים שלו. ממש כמו בשפה הרגילה, "שיח עור" צריך להיחקר ולעבור ניסיונות לפני שיהיה מובן. EMG וביו-פידבק מבוסס טמפרטורה הם, לשם השוואה, קלים יותר להבנה בשל האופי הפשוט של תגובתם לאירועים מנטאליים. במלים אחרות EMG וביו-פידבק מבוסס טמפרטורה נוטים לא לשקף מצבים מנטאליים באותה מהירות ועם רזולוציה גבוהה כמו של GSR.

תופעות אלקטרו-דרמיות הן לעתים קרובות מומשגות פחות טוב ומקבלות יחס מזלזל יותר מסוגים אחרים של ביו-פידבק בשל המורכבות, שונות בין מטופל למטופל, קשיים מתודיים במדידה, והערב רב של גישות טכניות. מטרת פיסקה זו היא להבהיר את התפיסה שמאחורי תופעת ההולכה החשמלית של העור ולתאר ולבקר כמה מן הגישות למדידת ההולכה והמכשור.

כפי שמתגלה מהסקירה ההיסטורית לעיל, נחקרו שתי גישות של EDA. השכיחה ביניהן היא הפעילות המתועדת ***אקסו-סומאטית (exosomatically)*** של Fere, Veraguth ויונג, לפיה זרם חשמל חיצוני מוזרם דרך העור. פעילות מזוהה על ידי ההתנגדות החשמלית של העור (או פעילות הגומלין שלה – מוליכות). השיטה השניה, של טרחנוף, היא פעילות מתועדת ***אנדו-סומאטית (endosomatically)*** (מתחי עור) הכרוכה בבקרת הפרשי מתחים בין אלקטרודות הממוקמות בשתי נקודות על פני העור. שיטה זו אינה מכוסה בפרק זה משום שהיא הרבה פחות שכיחה בביו-פידבק מהשיטה הראשונה. לעיון נוסף על השיטה האנדו-סומאטית, ראה Venable and Christie (Venable & Christie, 1980).

מונחים

GSR הוא ללא ספק המונח המוכר ביותר אוניברסאלית עבור EDA. הסיבה לכך היא אולי משום שהמונח משמש זמן רב בהקשר של מגוון גדול של תופעות אקסו-סומאטיות ואנדו-סומאטיות כאחת, ולציון רמה ורגישות אלקטרו-דרמית. למרות שהמונח GSR ימשיך קרוב לודאי לשמש בהקשרים רחבים, הוצעה טרמינולוגיה אחרת, יותר ספציפית, אשר מתארת טוב יותר תופעות אלקטרו-דרמיות יותר ספציפיות. להלן המינוח המשמש בפרק זה, כפי שאומץ מ- Venable and Christie (Venable & Christie, 1980) .

EDA, electrodermal response (EDR) תגובה אלקטרו-דרמית, ו-electrodermal level (EDL) רמה אלקטרו-דרמית משמשים כמונחים כלליים לתופעות אקסו-סומאטיות או אנדו-סומאטיות: EDL מתייחס ***לרמות*** הבסיס, EDR מתייחס ***לתגובות*** מעל לרמות הבסיס, ו EDA הוא המונח הכללי ביותר, המתייחס ***לרמות ולתגובות*** גם יחד.

פעילות ההולכה החשמלית של העור (SCA) תגובת המוליכות של העור (SCR), ורמת מוליכות העור (SCL), מגדירות את השיטה האקסו-סומאטית ואת סקאלת המוליכות (בניגוד להתנגדות). גם כאן, SCL מתייחס ***לרמות*** הבסיס, SCR מתייחס ***לתגובות*** מעל לרמות הבסיס, ו SCA מתייחס ***לרמות ולתגובות*** גם יחד.

מינוח מקביל משמש לציון התנגדות ומתח עור: פעילות ההתנגדות של העור (SRA), תגובת התנגדות העור (SRR), ורמת התנגדות העור (SRL), פעילות המתח של העור (SPA), תגובת מתח העור (SPR), ורמת מתח העור (SPL).

טבלה 4.3 מבהירה את משמעויות של כל המנחים והיחסים ביניהם. למרות שהטבלה מכילה 12 מונחים, פרק זה עוסק רק ב SCA, כלומר SCL ו SCR. אלה הם בברור מונחים עיקריים של ביו-פידבק אלקטרו-דרמי.

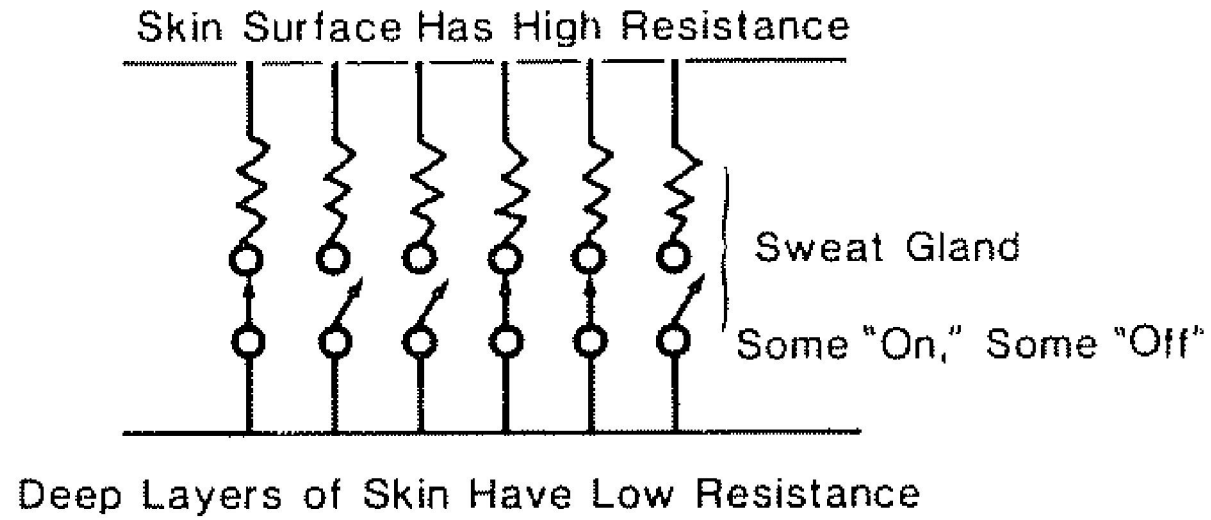
טבלה 4.3 סיווג הגדרות מונחים אלקטרו-דרמיים

	Endosomatic or exosomatic	Exosomatic		Endosomatic
		Conductance	Resistance	
Activity	EDA	SCA	SRA	SPA
Response	EDR	SCR	SRR	SPR
Level	EDL	SCL	SRL	SPL

מודל חשמלי של העור

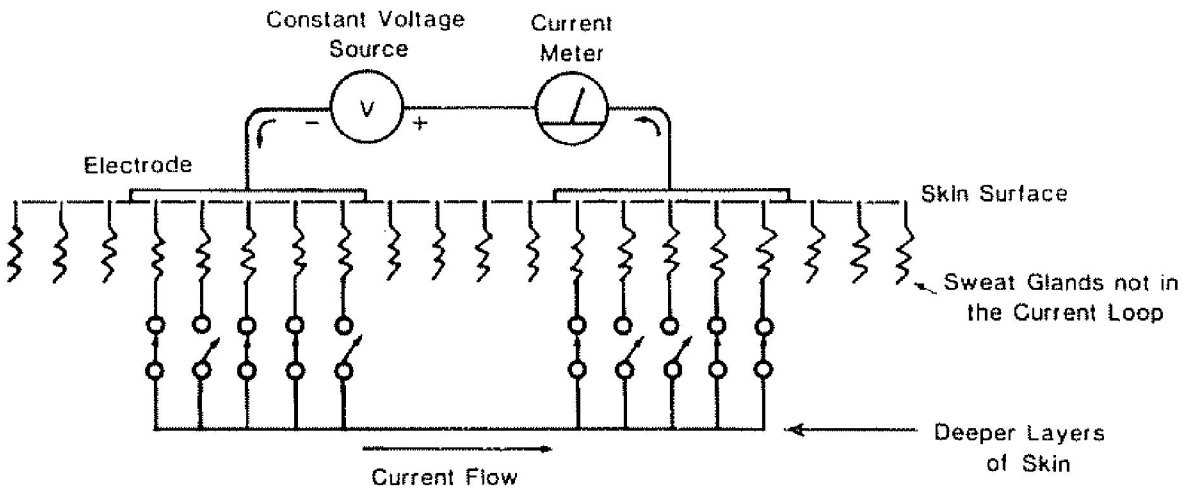
העור מורכב מבחינה חשמלית, איש אינו יכול לטעון לשליטה מושלמת בכל הידע של פיזיולוגית EDA. ואולם המודל החשמלי של העור המובא להלן מתמצת את המאפיינים העיקריים שלהם חשיבות מעשית בביו-פידבק.

העור על משטח כף היד מכיל עד 2000 בלוטות זיעה לסנטימטר מרובע, כל בלוטת זיעה, כאשר היא מופעלת, יכולה להיחשב כנתיב חשמלי נפרד ממשטח העור, שבדרך כלל הוא בעל התנגדות גבוהה, לשכבות יותר פנימיות ויותר מוליכות של העור.תופעה זו מוצגת בתרשים 4.21 המבוסס על Venables and Christie (Venables & Christie, 1980)



תרשים 4.21 מודל חשמלי של העור (Christie, 1973,1980 & Venables)

כל נגד מייצג נתיב מוליך של בלוטת זיעה. לצורכי המחשה, נניח שלבלוטת הזיעה שני מצבים – "פעיל" או "מופסק". כאשר היא במצב "פעיל", היא יוצרת נתיב התנגדות נמוכה מפני העור לעבר שכבות פנימיות יותר. כאשר היא במצב "מופסק" היא יוצרת נתיב התנגדות גבוהה. בתרשים 4.21, מספר בלוטות מוצגות במצב "פעיל" ואחרות מוצגות במצב "מופסק". מאחר והשכבות הפנימיות של העור הן בעלות מוליכות טובה מאד, ולעומתן השכבות החיצוניות הן בעלות התנגדות גבוהה, הנגדים מחוברים חשמלית בשכבות הפנימיות של העור אך מבודדים חשמלית האחד ממשנהו על פני העור. מצב זה מאפשר בקרה של הפעילות החשמלית של בלוטות הזיעה. אם נניח שתי אלקטרודות על פני עור הגדוש מטבעו בבלוטות זיעה, ונחבר מקור מתח לאלקטרודות, ייווצר מעגל חשמלי, וזרם חשמלי יזרום דרכו. עצמת הזרם תלויה (על פי חוק אוהם) בהתנגדות החשמלית של העור, אשר תלויה מצידה במספר בלוטות הזיעה הנמצאות במצב "פעיל" . ראה תרשים מספר 4.22 להמחשה. ככל שעולה מספר הבלוטות הפעילות, יותר נתיבי הולכה חשמלית מזינים את המעגל, ועוצמת הזרם עולה בהדרגה (שכן כל נתיב הולכה מוסיף זרם כלשהו לסך הכול הזרם במעגל). ההבדל הוא שהעור (במקום טמפרטורת ההתקן) משמש כנגד משתנה המווסת את עצמת הזרם במעגל החשמלי. מד הזרם מודד את עצמת הזרם במעגל, והוראתו היא פרופורציונית לפעילות בלוטות הזיעה. (כדאי לסקור מעגל זה בפסקה העוסקת במכשירי ביו-פידבק מבוססי טמפרטורה, תוך החלפת "התנגדות העור" עם "התנגדות ההתקן" בהסבר חוק אוהם).



תרשים 4.22 מעגל הולכה בסיסי של העור

סקאלות ומדידה: התנגדות ומוליכות

בנקודה זו, אנו יכולים להבחין בין התנגדות להולכה ולהסביר מדוע הולכה היא יחידת המדידה המועדפת. "התנגדות" ו"מוליכות" מוגדרות כהפכיות אחת לשנייה, והם מיציגות אותה תכונה חשמלית יסודית של חומרים. ככפי שדנו קודם לכן האוהם הוא יחידת התנגדות. יחידת המוליכות היא "mho" (מו, או אוהם בהיפוך אותיות) והיא מוגדרת כמידה ההפכית של התנגדות (כלומר 1 חלקי ההתנגדות). אלה הן שתי סקאלות למדידת אותה התופעה (ראה טבלה 4.4).

מונח חדש יותר עבור מיקרו-מו (מיליונית המו) הוא" מיקרו-סימנס". מונח זה מופיע בפרסומים מאוחרים של ספרי לימוד והוא מונח נרדף ל"מיקרו-מו". בפרק זה נמשיך להשתמש ב"מיקרו-מו" משום שמונח ישן זה נהיר יותר לרוב הקוראים.

למרות שסקאלות התנגדות ומוליכות מודדות אותה תכונה, יש סיבה טובה להעדיף את השימוש בסקאלת המדידה של מוליכות. נזכור שכאשר "מופעלות" בלוטות הזיעה, הן מוסיפות נתיבי הולכה על גבי העור. משמעות הדבר היא ש המוליכות גדלה ביחס ליניארי למספר בלוטות הזיעה המופעלות. התנגדות, לעומת זאת, יורדת באופן לא לינארי כאשר יותר ויותר בלוטות זעה מופעלות. תופעה זו מוצגת גראפית בתרשים מספר 4.23.

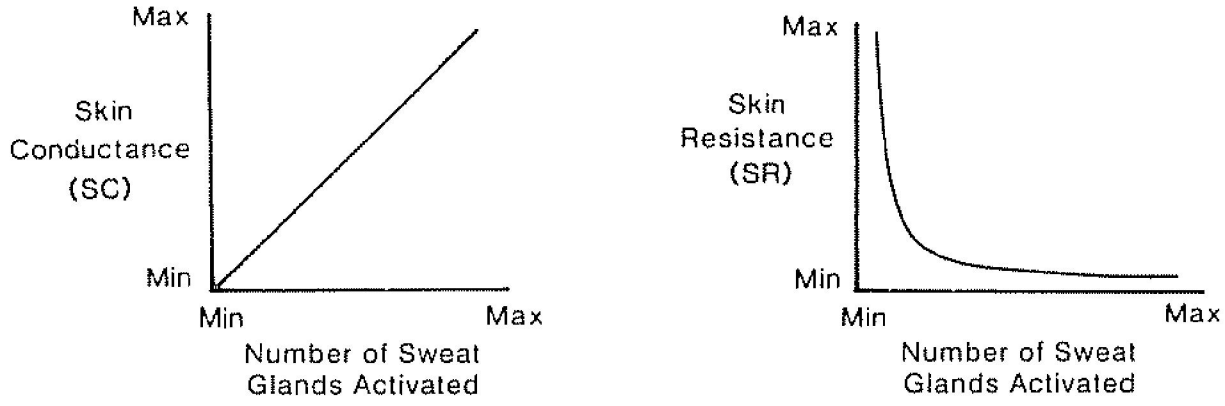
היחס הליניארי בין פעילות בלוטות הזיעה לבין מוליכות העור עדיף סטטיסטית לצרכי כיול וכימות. מסיבה זו מוליכות הער היא היחידה התקנית. לעתים נוח יותר לחשוב במונחי התנגדות מאשר מוליכות (למשל כאשר משתמשים בחוק אוהם או בודקים אלקטרודות). עם הבנת יחסי הגומלין בין שתי הסקאלות, המעבר מאחת לשנייה אינו מהווה כל בעיה.

ואם בעניין סקאלות ומדידה עסקינן, שימו לב שמוליכות אינה מידה ישירה של פעילות בלוטות הזיעה (כלומר כמה מהן מופעלות). זו מדידה עקיפה אשר, חוץ מתופעות לוואי, תואמת מאד לפעילות בלוטות הזיעה. במלים אחרות, מוליכות הינה קונצפט חשמלי, לא פיזיולוגי. זו אינה מידה ידירה של כמה בלוטות זיעה נמצאות במצב פעיל. משום שמוליכות העור קיימת רק כאשר מתח חשמלי חיצוני מופעל על העור, מכשיר המדידה קשור לתופעת מוליכות העור באופן מורכב ותורם משמעותית להבחנה. לאילו מכם שהם בעלי רקע וכישורים טכניים, מכשירי ביו-פידבק מבוססי התנגדות העור או מוליכות העור מתוכננים כאוהם-מטר או מו-מטר. ככאלה, הם יכולים למדוד אובייקטיבית כל רשת שקולה לחשמלית המחוברת לכניסות שלהם. הן מאופיינות חלקית על ידי האופן בו הן מפעילות פעילות חשמלית לעור – על ידי מתח קבוע (DC) או ע"י מתח חילופין (AC) – ועל פי הוראת התוצאה –

באוהם או במו. אם המכשיר מספק סקאלה מכוילת, הכיול נעשה בדרך כלל על ידי מדידה של נגדים פשוטים שהתנגדותם ידועה מראש, והשוואת הערכים המתקבלים מהוראת המכשיר בהתאם למפרט הדיוק שלו.

טבלה 4.4 התאמה בין מוליכות להתנגדות

Conductance	Resistance
Units	
Mho	Ohm
Micromho (millionth)	Megohm (million)
Conversion formulas	
Conductance = 1/resistance	Resistance = 1/conductance
Mho = 1/ohm	Ohm = 1/mho
Micromho = 1/megohm	Megohm = 1/micromho
Sample correspondences	
1 micromho ~ 1 megohm	
10 micromhos ~ .1 megohm	
100 micromhos ~ .01 megohm	
Range of skin conductance values	
Approx. 0.5 micromho to 50 micromhos	Approx. 0.02 megohm to 2 megohms



תרשים 4.23 השוואה בין סקאלות מוליכות (שמאל) והתנגדות (ימין) של העור

הבעיה היא שהעור מהווה רשת חשמלית מורכבת הרבה יותר מאשר נגדים פשוטים המשמשים לכיול. בלוטות זיעה לא מתפלגות באופן אחיד על פני רקמת העור, כך שאתרי חישה ושטח המגע של האלקטרודות משפיעים על המדידה. אם משתמשים במעגלי זרם ישר, חומרי האלקטרודה עשויים להיות חשובים במיוחד, משום שמתח יכול להצטבר על פני נקודת הממשק של העור עם האלקטרודה, ולהפוך במקרה כזה למעין מצבר זעיר המשפיע על תוצאת המדידה. תופעה זו מכונה "קיטוב האלקטרודה" ונדון בה מאוחר יותר. שימוש באלקטרודות כסף/כסף

כלורידי יכול להקטין אך לא לבטל כליל תופעת לוואי זו. אם משתמשים במעגלי זרם חילופין, אפקט הקיטוב מינימאלי, אך אבל רכיבים "מגיבים" של המעגל החשמלי השקול של העור יגרמו כביכול למוליכות גבוהה יותר של העור. (תופעות לוואי אלה ואחרות יידונו מאוחר יותר בפרק). לבסוף, ההתנגדות החשמלית של רקמות העור עשויה להשתנות עם עצמת הזרם במעגל הזרימה.

לסיכום, אל לעוסקים בביו-פידבק להניח שתוצאות ופרסומים כמותיים של SCA הם ברי השוואה. מפרטי תנאי הבדיקה, כפי שתואר לעיל (בתוספת הידע הטכני הנדרש כדי לפרשם נכונה) הינם תנאי הכרחי לצרכי השוואת מדידות SCA מהקשרים שונים.

פרמטרים של SCA

הרשומה ההיפותטית של 20 שניות המתוארת ב תרשים 4.24 מעלה שלשה פרמטרים ראשיים ושני פרמטרים משניים. תיאורים דומים של מדידה וצורות גל אופייניות מופיעים אצל (Stern, Ray, & Quigley, 2001) .

פרמטרים ראשיים

SCL או רמה טונית: SCL מבוטא במיקרו-מו, ומייצג רמה תחילית או רמת מנוחה. למרות שרמה זו יכולה להשתנות, ינוע ערכה קרוב לודאי סביב הערך המכונה כערך הטוני אצל אדם שליו השרוי במנוחה. SCL , או הרמה הטונית, נחשבים כאינדקס של רמה תחילית של פעילות בלוטות זיעה, אינדיקציה מוסקת לעירור סימפתטי יחסי. לדוגמא, ערכי מוליכות הגבוהים מ- 10- 5 מיקרו-מו נחשבים גבוהים יחסית, בעוד שערכים מתחת ל-1 מיקרו-מו נחשבים לנמוכים. יש לזכור שהערכות אלה תלויות במשתנים רבים נוספים ולכן יש לראות בהן כלל אצבע בלבד המבוסס על אלקטרודות יבשות של **3/8** אינץ' המונחות על צד כף היד של האצבעות.

SCR או שינויים פאזיים

שינויים פאזיים הם אפיזודות ברורות של הגברת מוליכות הנגרמת כתוצאה מעירור סימפתטי בתגובה לגירוי. לדוגמא, במקרה של גירוי המתרחש אחרי 0.5 שניות, יש פיגור של שנייה עד 2 שניות ולאחריו עליה במוליכות עד לשיא, התייצבות, ונפילה חזרה לרמה התחילית או הרמה הטונית, נאמר שזהו שינוי פאזי, ועוצמתו (גובהו) מבוטא כמספר המיקרו-מו אליו הגיע מעל לרמה התחילית. מידת השינוי הפאזי נחשבת כאינדיקציה לרמת העירור הנגרמת כתוצאה מגירויים (כגון תגובת בהלה או הסתגלות לגירוי פנימי או חיצוני).

זמן מחצית-התאוששות של SCR

"זמן מחצית-התאוששות של SCR" מוגדר כזמן שעובר משא השינוי הפאזי ועד למחצית הדרך לרמה התחילית. זמן מחצית-התאוששות של SCR נחשב כמדד ליכולת הנבדק להירגע לאחר התרגשות ארעית. משערים שאנשים הסובלים מעירור-יתר (overarousal) כרוני מתקשים לחזור למצבי רגיעה תחיליים גם לאחר גירוי קלוש מאד.

פרמטרים משניים

"עכבת SCR" מוגדרת כזמן החולף מתחילת הגירוי ועד להתחלה של SCR. "זמן עליית SCR" מוגדר כזמן החולף מרגע התחלת ה SCR ועד שהוא מגיע לשיא שלו. לפרמטרים אלה אין כמעט משמעות בביו-פידבק, ולפיכך אינם נדונים כאן בפירוט.

ערכי פרמטרים נורמטיביים

רשומת ה- SCA ההיפותטית בתרשים 4.24 מראה ערכי פרמטרים ספציפיים. ערכים אלה הינם ערכים ממוצעים ממשיים שנלקחו מדוגמאות נורמטיביות של רשומות SCA השאולות מאוכלוסיה לא קלינית , כפי שסוכמו על ידי (Christie, 1973,1980 & Venables). ברם, אלה אינם בהכרח ערכים מייצגים ברי הדגה בטיפולי ביו-פידבק. מאחר והבדלים אישיים משמעותיים ב SCL ו SCR הינם שכיחים, אין זה מפתיע שמתקבלות תוצאות שונות לחלוטים מאלה המוצגים בתרשים 4.24. יתרה מכך, מקורות פוטנציאליים לשונות נורמטיבית כוללות הבדלים בין קבוצות מטופלים ולא-מטופלים, השפעות לקיחת תרופות על SCL ו SCR, נהלים שונים לביסוס רמה תחילית,

ובמיוחד SCR, וההבדלים הגדולים במכשור וסוגי האלקטרודות שיימצאו בשימוש. לדיון באפקטים של משתנים כגון טמפרטורה, לחות, שעת הטיפול, או עונה, ראה (Venables & Christie, 1973,1980).

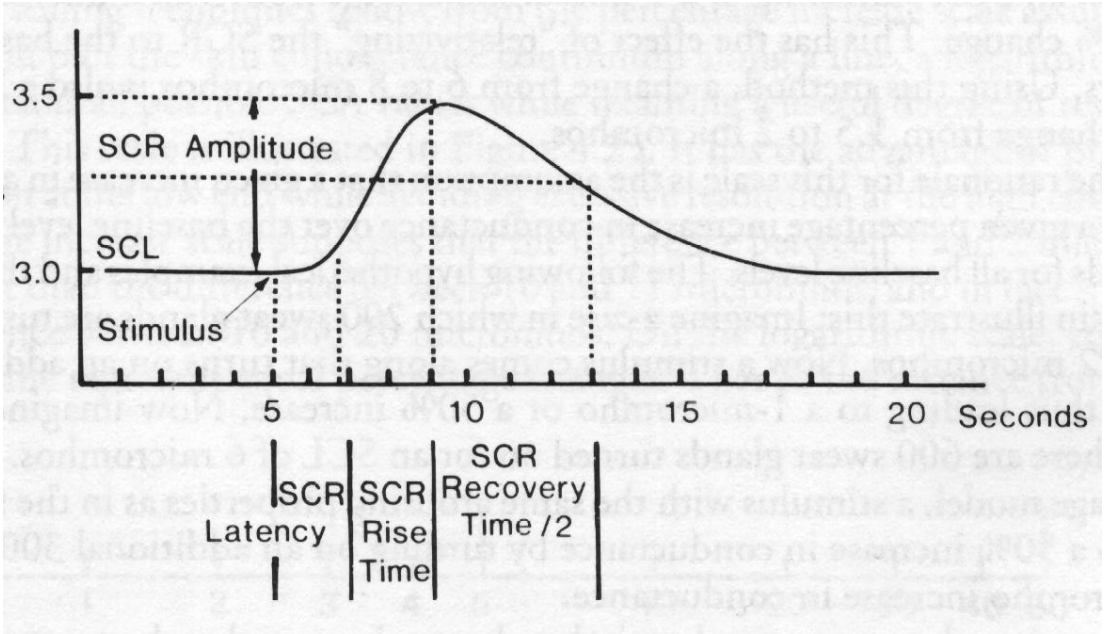
עצתי לך הקורא היא כזו: כדי להגביר את ביטחונך בנורמות, מצא או התקן דוגמאות נורמטיביות ספציפיות למכשור בו אתה משתמש ולאוכלוסיה איתה אתה מתעתד לעבוד. בשלב זה אין תחליף בטוח להתנסות סיסטמתית מצטברת עם קבוצת המטופלים שלך, מטרותיך, והציוד בו אתה משתמש. אין בכוונתי לרפות ידי המטפלים או לזלזל בתחום. זוהי הסתכלות מפוכחת על המצב השורר כיום בענף זה.

סקאלות ומדידה: "שיעור הגידול"

סקאלה למדידת משרעת (אמפליטודה) של SCR

הצגת משרעת ה- SCR כעלייה במספר המיקרו-מו אינה האלטרנטיבה היחידה. ניתן להציג משרעת SCR גם כאחוז השינוי מהרמה הטונית. לדוגמא, SCR הכולל שינוי של 1 מיקרו-מו מ-3 ל-4 מיקרו-מו יבוטא כשינוי של 33% . לשיטה זו יש אפקט של "ייחוס" ה SCR לרמה התחילית ממנה התחיל. לפי שיטה זו, שינוי מ-6 ל-8 מיקרו-מו הוא גם כן שינוי של 33%, כמו גם שינוי מ-1.5 ל-2 מיקרו-מו.

הרציונאל מאחורי סקאלה זו הוא ההנחה שגידול נתון בעירור אוטונומי יביא לשיעור נתון של גידול במוליכות מעל לרמה התחילית, וטענה זו נכונה עבור כל רמה תחילית שהיא. הדוגמא ההיפותטית הבאה והמודל החשמלי של העור ממחישים טענה זו. נניח ש-200 בלוטות זיעה מופעלות, ויוצרות בכך SCL בן 2 מיקרו-מו. כעת מגיע גירוי שמפעיל עוד 100 בלוטות זיעה, ובכך מוביל ל-1 מיקרו-מו, או גידול של 50%. כעת נניח מקרה אחר, בו מופעלות 600 בלוטות זיעה כדי ליצור SCL בן 6 מיקרו-מו. לפי מודל שיעור הגידול, גירוי של אותן תכונות עירור כמו במקרה הקודם יביא שוב לגידול של 50% במוליכות ע"י הפעלת 300 בלוטות זיעה נוספות, לקבלת גידול בן 3 מיקרו-מו במוליכות.



תרשים 4.24 פרמטרים של מוליכות העור (ערכי SCA המוצגים לקוחים מ (Christie, 1980 & Venable)).

ההנחה כאן היא ששינויים בעירור נאמדים טוב יותר כשיעור בגידול המוליכות מעבר לרמה התחילית מאשר גידול בערך המוחלט במוליכות ללא קשר לרמה התחילית. בהקבלה מהתחום הכלכלי השיטה הזו דומה לתיאור הגידול בתל"ג כשיעור העלייה באחוזים מעל לרמת השנה הקודמת, במקום לתאר אותו במונחים כספיים מוחלטים (כלומר הגידול בדולרים).

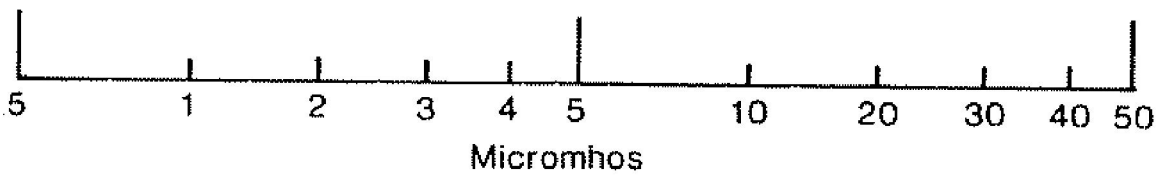
תפיסת עצמה קולית יכולה לספק מקבילה נוספת: כדי להשיג הגברה נתונה בעצמת הקול הנתפסת יש להגביר אותו במידה רבה יותר בסביבה רועשת מאשר בסביבה שקטה. אם SCR הוא מעין "תגובת הסתגלות", סביר להניח שכדי להיות "מורגש" באופן פסיכו-פיזיולוגי, גירוי צריך לגרום להגברה משמעותית ברמת המוליכות ביחס לרמה התחילית הבסיסית של עירור – בדומה למה שקורה בתפיסת עצמת הקול.

תפיסת גובה צליל מספקת אנאלוגיה שלישית. הבדל הצליל בין תו "דו" לתו "לה" שמעליו נשמע זהה בכל אוקטאבה. (זהו מרווח מוסיקלי של ששית). ההפרש בין דו אמצעי (256 הרץ) ללה שמעליו (440 הרץ) הוא 184 הרץ, תוספת של 72% בתדירות. ההפרש בין הדו הבא (512 הרץ) ללה שמעליו (880 הרץ) הוא 368 הרץ, אבל הו גם כן תוספת של 72% בתדירות. במקרה זה, שיעור התוספת בתדירות, במקום מספר התנודות לשנייה, מביא לתפיסה של עליית צליל זהה.

סקאלת התוספת המוחלטת של מיקרו-מו עבור משרעת SCR נשענת על ההנחה ההפוכה מזו שבסיס סקאלת שיעור השינוי: כלומר, גידול של מוליכות במיקרו-מו מצביע על גידול נתון בעירור, לא חשוב היכן נמדד על רצף הרמות התחיליות האפשריות –עליה קבועה (באופן מוחלט) בעירור, ללא תלות ברמה התחילית. גם תפיסה זו מתקבלת על הדעת.

אין, למיטב ידיעתי, כל פרסום או טיעון קונספטואלי ברור התומך או מזים אחת משתי ההנחות שהוצגו לעיל. כל אחת מהסקאלות הללו מתקבלת על הדעת ויש לה הגיון, ועדיין לא ברור לאיזו משתיהן יתרונות פרקטיים ניכרים או הלימות פסיכו-פיזיולוגית. למרות האמור לעיל, אני מעדיף את ההנחות התומכות בשימוש סקאלת שיעור הגידול עבור משרעת SCR. זאת מהטעם שהשיטה של ייחוס גודל השינויים לרמה התחילית הוא הולם ושימושי בהקשרים תפיסתיים שעבורי הם אנלוגיים ל SCR. בנוסף, התצפיות הלא פורמאליות שלי מצביעות על כך שאנשים שלהם רמה תחילית נמוכה של SCL מציגים לעתים קרובות פחות מיקרו-מו של SCR מאשר אנשים שלהם רמה תחילית ממוצעת של SCL. לגבי דידי, סבירות פנימית ותצפיות לא-פורמאליות אלה מטים את הכף לטובת סקאלת שיעור הגידול עבור משרעת SCR. למרות זאת, ברמות גבוהות מאד של SCL, ההלימה של סקאלת שיעור הגידול קרוב לודאי פוחתת, משום שרוב בלוטות הזיעה הזמינות כבר מופעלות כדי שיושג הערך הגבוה של ה SCL.

קנה מידה נוח נובע מהנחת שיעור הגידול. אם רצף ערכי מוליכות העור מוצב לאורך קו, סקאלה לוגריתמית תכיל בקלות את כל הערכים האפשריים של SCL, בעודה מאפשרת רמה סבירה של רזולוציה עבור SCR לאורך כל הקו. הסקאלה מודגמת בתרשים מספר 4.25 . יתרונה הוא בכך שהיא מאפשרת רזולוציה מספקת בתחום הנמוך, אבל מונעת רזולוציה מופרזת בתחום הגבוה. נזכר שסקאלת שיעור הגידול מניחה שההפרש בין 1 ל-2 מיקרו-מו הוא יוצר משמעותי מההפרש בין 10 ל-11 מיקרו-מו, והוא אקוויוולנטי להפרש בין 10 ל-20 מיקרו-מו. על הסקאלה הלוגריתמית, מרחק שווה לאורך הקו מייצג שיעור שינוי שווה.



תרשים מספר 4.25 סקאלה לוגריתמית של ערכי SCA

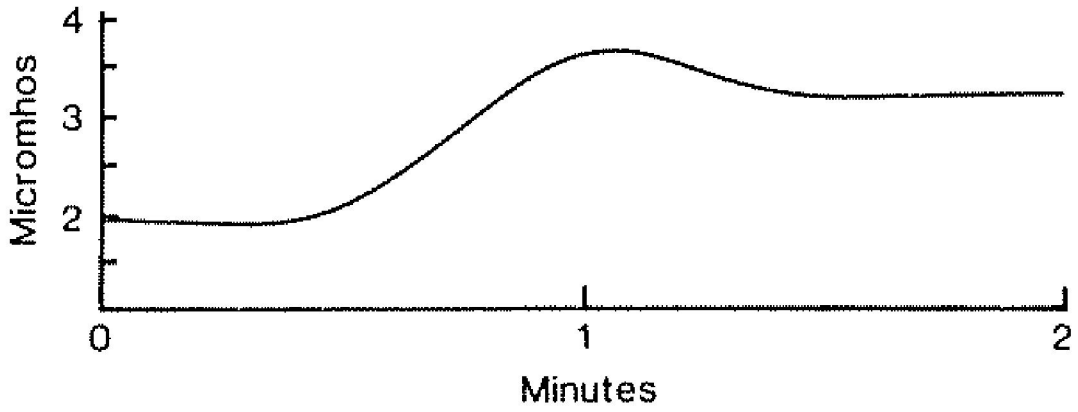
כלומר, ההפרש בין 1 ל-2 זהה לזה שבין 10 ל-20: שניהם שווים ל 100%. משמעות הדבר היא שמשרעת SCR של כל שיעור נתון מיוצגת של ידי מרחק שווה לאורך הקו, ללא קשר לרמה התחילית.

פענוח רשומת מוליכות עור

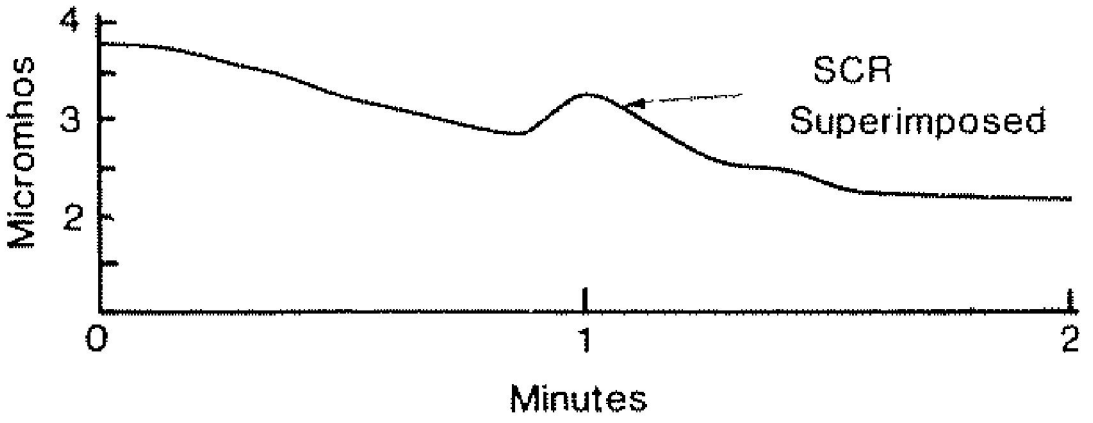
שלושת הפרמטרים הראשוניים שדנו בהם קודם לכן מסייעים לאנשי מקצוע לתאר רשומות ממשיות של מוליכות עור ולשלוף מהן נתונים. ואולם משום שהרשומות מכילות בדרך כלל נתונים מעורבים של שינויים הן בצד התגובות והן בצד הרמות, נדרשת פרשנות על פי רוב כדי למצוא את ערכי הפרמטרים. להלן תיאורים פרדיגמתיים (של תבניות מחשבה) של רשומות מוליכות עור מורכבות ואינטרפרטציות משוערות שלהן.

שינוי רמה יונית כלפי מעלה

רשומת הדוגמא בתרשים 4.26 מגלה שינוי פאזי של התרחקות מהרמה הטונית התחילית, וחזרה לא שלמה אליה. ניתן לחשוב על כך כ SCR שלא התאושש וגרם לרמה טונית גבוהה ממנה החלו לצאת שינויים פאזיים נוספים. ההשערה היא שהעירור שגרם לשינוי הפאזי לא "חלף" עדיין, ובכך הותיר את המטופל ברמה טונית חדשה גבוהה יותר. הגברת המוליכות עשויה להיות אטית כ"סחף" במקום בקצב מהיר כמו ב SCR אופייני.



תרשים מספר 4.26 תזוזה למעלה של הרמה הטונית.



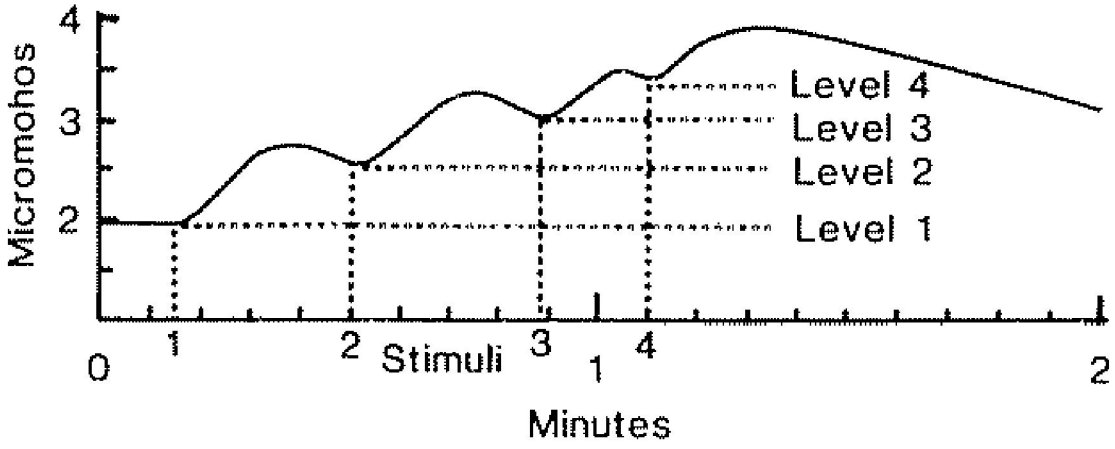
תרשים מספר 4.27 תזוזה למטה של הרמה הטונית.

שינוי רמה יונית כלפי מטה

העירור שהביא לרמה הטונית החדשה (גבוהה יותר) בה דנו בסעיף הקודם עשוי ל"שכוח" עם הזמן, או ל"הרפות", מה שיביא למגמת ירידה במוליכות העור. כפי שמדגים תרשים 4.27, לרשומה זו שיפוע שלילי (כלפי מטה), למרות ש SCR עשויים להתווסף. באופן כזה, תיווצר בסופו של דבר רמה טונית חדשה – נמוכה יותר.

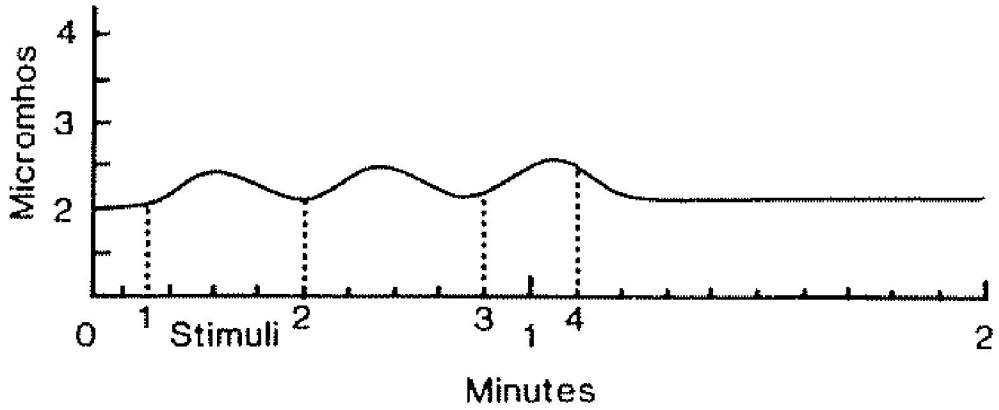
טיפוס מדרגות

בתגובה לגירויים מעוררים מרובים, ובמיוחד אצל אנשים המאופיינים בשינויים פאזיים מסדר גודל גבוה וזמן התאוששות ארוך, תופעת "טיפוס מדרגות" ("stairstepping")עשויה להתרחש. כפי שנראה בתרשים 4.28, התופעה קורית כאשר גירוי מעורר מתרחש לפני שהשינוי הפאזי מהגירוי הקודם הספיק לחזור לרמה הטונית הקודמת. ה SCA עשוי במקרה כזה ל"עלות מדרגה" גבוהה יותר ויותר. תהליך טיפוס מדרגות זה עלול תיאורטית להסתבך ולהתפתח לעירור יתר. תרשים 4.29 מדגים כיצד אנשים בעלי שינויים- פאזיים מסדר גודל נמוך וזמן התאוששות (שיבה לרמה תחילית) קצר יותר פחות רגישים לגירויים חוזרים ונשנים.



תרש

ים 4.28 טיפוס מדרגות



תרשים 4.29 התאוששות מהירה – חזרה מהירה לרמה תחילית, הקטנת טיפוס המדרגות.

דפוס לא נענה (Nonresponsive)

"דפוס לא נענה" הוא צורה מיוחדת של רמת מוליכות קבועה (ראה תרשים 4.30), שלא מגיב לגירוי שבדרך כלל מעורר, אפילו כשיש סיבה להניח שעירור או רגש צריכים להתקיים. ההסבר המשוער לדפוס זה, בצורתו הקיצונית, הוא חוסר יכולת להתנתק, שליטת יתר, או חוסר אונים במקום הרפיה (Toomin & Toomin, 1975).

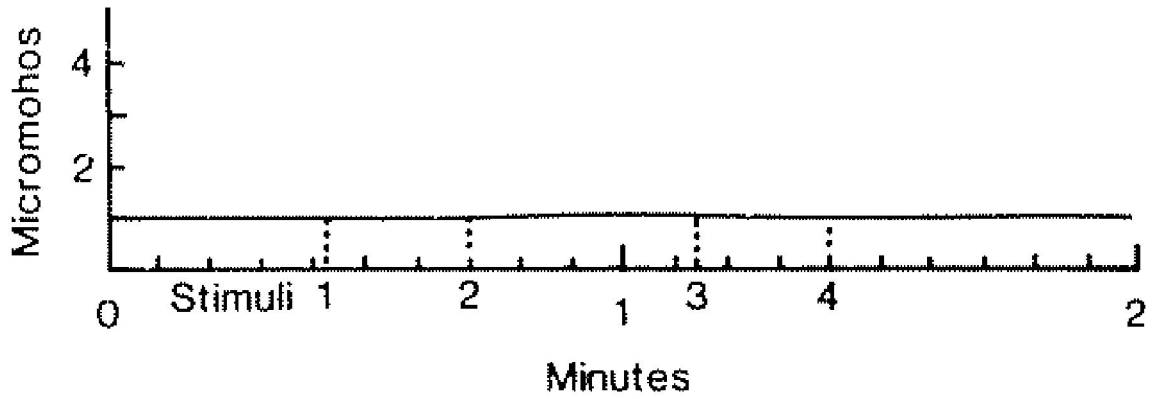
דפוסי מוליכות עור אופטימאליים

מוליכות עור קשורה לעירור, אבל דפוסי SCA אופטימאליים אינם בהכרח הדפוסים הנמוכים או השטוחים ביותר. זאת משום שעירור מתמשך, שליטת יתר, חוסר תשומת לב, או רגשות מוקהים לא נחשבים לבריאים או הסתגלותיים. יש מקום לצמצום העירור במהלך הרפיה עמוקה, אשר בה רמה קבועה ונמוכה של מוליכות עור היא רצויה, אבל רמות אחידות לא משתנות הן לא בהכרח רצויות.

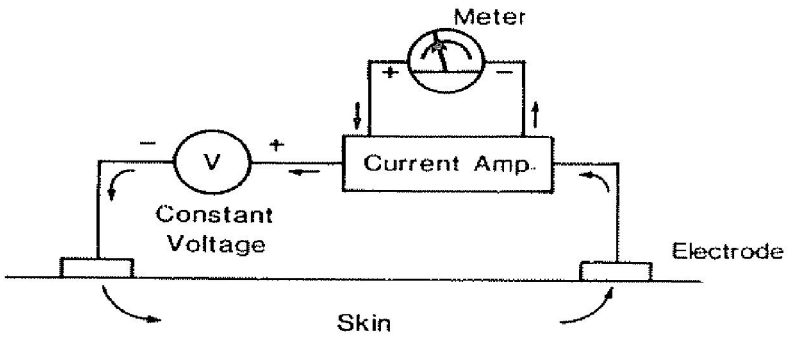
למשל, התקלות עם גירוי מסוג חדש מזמינה זיהוי וטיפול הולמים. הקהיה טבעית של עירור הקשור להסתגלות או פעולה אינה נחשבת בריאה או הסתגלותית. למרות זאת, עם ההסתגלות לגירוי חדש ונקיטת הפעולה ההולמת, עירור צריך לרדת לרמה התחילית, כדי להימנע מעירור לא נחוץ או בזבוז אנרגיה. ייתכן שאדם יגיב במרץ רב מדי לגירוי חדש, כך שהתגובה היא לא פרופורציונית . במקרה כזה, האדם יוצר גירויים שהם יותר מפחידים, מסוכנים, או מרגשים מהנדרש, ומשלם על כך מחיר של אנרגיה ומתח פיזי.

SCA אינו גורם שיש להקטין אלא להפוך לאופטימאלי, ולשם כך נדרש שיקול דעת הנוגע למה הולם אדם מסוים בנסיבה נתונה. נכון לעכשיו, אין איש טוען לידיעה ודאית של רמות טוניות אופטימאליות, וSCR, או אף להוכיח שיש בכלל רמות אופטימאליות ברות הגדרה. מה שברור הוא שקיימות אפשרויות לתגובת-יתר או תגובת-חסר, וזה נכון לגבי רמות טוניות ושינויים פאזיים. חזרה מהירה לרמה התחילית לאחר SCR היא כמעט תמיד רצויה, למעט כאשר היא חלק מדפוס של תגובת-חסר.

מאחר וקיימים הבדלים אישיים גדולים בדפוסי SCA וחוסר בנתונים נורמטיביים העומדים מאחורי תבניות תקניות של גירוי ומדידה, קשה להגדיר נהלי אימון להרפיה בעזרת SCA שיהיו ברורים ומוסכמים על הכול. ביופידבק מוצלח מבוסס SCA דורש נסיון ושיקול דעת מצד המטפל. הדרך הטובה ביותר לרכוש את ה"תחושה" כיצד SCA פועל בתנאים מסוימים היא להתבונן על התהליך של ובין אנשים שונים, ובמיוחד עצמך. מי שעובדים באופן סדיר עם SCA ממהרים להביע על אי הבהירות למצבים רגשיים ארעיים ולמחשבות. המורכבות הברורה וחוסר הבהירות עשויים להסתיר עושר רב של מידע פסיכולוגי ופיזיולוגי שימושי עבור מי שיש להם הסבלנות ללמוד ולהמשיך בחקר הדפוסים של SCA.



תרשים מספר 4.30 דפוס לא נענה (Nonresponsive)



תרשים 4.31 הסכימה הבסיסית ביותר של בקרת SCA

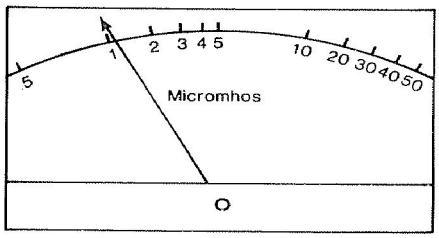
תפעול מכשיר מוליכות העור

סכימה בסיסית ביותר של מתח ישר קבוע

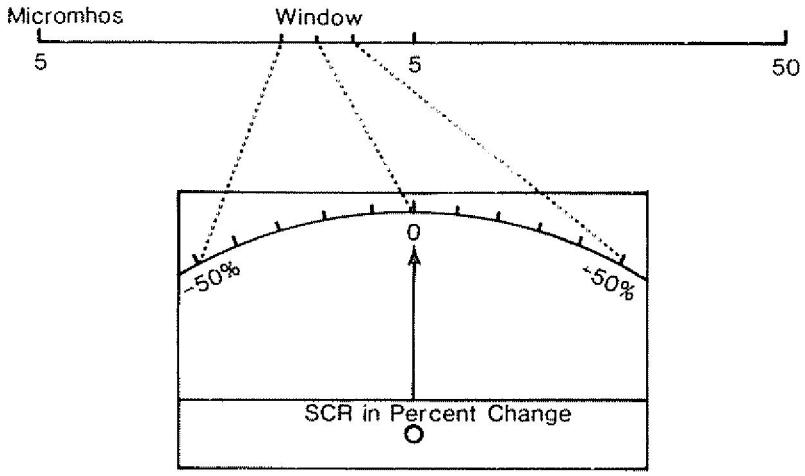
תרשים 4.31 מתאר את הסכימה הבסיסית ביותר של בקרת SCA. מתח קבוע מופעל על שתי אלקטרודות. ההתנגדות המשתנה של העור מובילה לזרם משתנה המוזרם במעגל. מגבר זרם מבקר זרם זה, ובאמצעות סקאלה מתאימה, מפעיל מכשיר מדידה המורה את התוצאה במיקרו-מו. באופן בסיסי זה, המכשיר דומה למכשירי הטמפרטורה המופיעים בתרשים 4.19. ברם, כדי להיות מעשיים, יש להגדיר אותו באופן מפורט יותר.

"חלון" תצפית מתכוונן

רמות תחיליות של SCL מתפרשות על פני תחום רחב, ובכל זאת חשוב להבחין ב-SCR קטנים (כגון 5% שינוי מכל SCL) מבין כלל הרמות התחיליות האפשריות. אם כל ערכי SCA האפשריים היו יכולים להיות מוכלים על פני שעון מדידה, ערכי SCL היו נראים, אבל SCR היו בקושי מסיטים את המחוון. תרשים 4.32 מדגים כיצד 5% SCR מ-1 מיקרו-מו SCL יהיה ניתן להבחנה בקושי רב. יידרש SCR גדול בהרבה כדי להסיט את המחוון מספיק כדי לאמוד בדיוק את משרעת ה SCR וזמן ההתאוששות. זהו הנושא המוכר של "רזולוציה", בו דנו קודם לכן בהקשר של מכשור ביו-פידבק מבוסס טמפרטורה. מד דיגיטלי פותר את בעיית הרזולוציה בפשטות על ידי הוספת ספרות לתצוגה (כגון עשיריות או אף מאיות). לעומת זאת, מד דיגיטלי אינו מתאים לתצפיות של SCR, משום שספרות משתנות אינן צורה נוחה לקריאה. בניגוד לכך, תנודת המחוון או עמודת אור הנעה מעלה ומטה נוחה הרבה יותר לקריאת נתונים של SCR.



תרשים 4.32 רזולוציה נמוכה מדי כאשר כל רצף ה SCA נדחס לחלון התצוגה של מכשיר המדידה



תרשים 4.33 חלון תצוגה מתכוונן

מד אנלוגי לתצוגת SCR הוא פתרון נפוץ לבעיה זו, בתנאי שמגבילים את תחום התצוגה שלו ל"חלון תצוגה" המראה רק חלק מרצף ה- SCA. מובן מאליו שחלון התצוגה חייב להיות מסוגל לכסות כל חלק מרצף ה-SCA, כך שניתן יהיה לעקוב אחר SCR ללא קשר לרמה התחילית של SCL. תרשים 4.33 מדגים גרפית את פעולת החלון. ה"חלון" המאפשר תצפית רק בתחום קטן של מרחב ה SCA, נפרש על פי כל הסקאלה של המכשיר. באופן זה, גם תוצאת SCR נמוכה מאד תגרום לתזוזה משמעותית של המחוג. נקודת האפס המרכזית על פני השעון בתרשים מייצגת את מרכז ***החלון*** .סקאלת השעון מכוילת כך שמידת תנועת המחוג מעידה על שיעור השינוי מהרמה התחילית.

בדוגמה המופיעה בתרשים, השעון מכויל ל 50% + או 50% - שינוי. המשתמש מפעיל כפתור שליטה מכויל המניע את החלון מעלה ומטה על פני רצף ה- SCA עד ש ה SCL של הנבדק "מופיע בתצוגה". אם מגיעים לרמה זו מצד שמאל , המחוון נשאר מחוץ לתחום התצוגה לימין, עד שהחלון מגיע ל SCL. ברגע שה SCL מוכל בתוך החלון, המחוון חוזר לשמאל התצוגה, בעוד החלון ממשיך לנוע לעבר נקודת האפס. כאשר המחוון מורה על נקודת האפס, החלון נמצא במרכז ה SCL של הנבדק. ערך ה-SCL נקרא משעון בקרה מכויל דיגיטלית המניע את החלון מעלה ומטה על פני רצף ה- SCA . כאשר מתרחש SCR, המחוון נע למעלה. בסטייה המקסימאלית, המחוון מורה על שיעור השינוי. כפתור הבקרה הדיגיטלית נשאר במקומו במהלך ה SCR, כך שהוא "זוכר" את הרמה התחילית של ה-SCL. במידה ושינוי ה- ACL של הנבדק גדול מאד, או "נסחף" , הנבדק { מזיז את החלון לאורך רצף ה SCA בעזרת כפתור השליטה הדיגיטלי. ה SCL נשאר "בטווח התצוגה", ושעון הבקרה הדיגיטלי מצביע על הרמה התחילית החדשה. בעת שימוש במחשב, פונקציות דומות ניתנות לתכנות כך שיחולו באופן אוטומטי.

על מנת להקטין את התכיפות שבה על החלון לנוע על מנת להשאיר את קריאת ה SCL בסקאלה, לחלק מהכלים "רוחבי" חלון או אפשרות רזולוציה מתכוננים. רוחב חלון גדול מאד (כגון שינוי של 100%) יכסה חלק גדול יותר מרצף ה SCA ולכן ידרוש כוונון מחדש לעיתים רחוקות יותר בעת סחיפת SCL או לתוצאות SCR גדולות. בנוסף, חלונות גדולים יותר מקטינים את הרזולוציה. כלומר, ערכי SCR נמוכים יבואו לידי ביטוי פחות על פני הסקאלה של המכשיר. בעת הבחנה בתוצאת SCL יציבה מאד עם ערך SCR נמוך מאד, מעבר לרוחב חלון צר (כגון ±10%) פורש שינויים קטנים על פני המונה, ועל-ידי כך מגביר את הרזולוציה הויזואלית של התגובה.

תפעול חשמלי של חלון התצפית המתכוונן

תרשים 4.34 מדגים מכשיר הולכת עור בעל חלון תצוגה מתכוונן. מקור המתח הקבוע מזין שתי לולאות זרם. הראשונה היא הלולאה העוברת דרך האלקטרודות והעור כפי שתוארה קודם לכן. הלולאה השנייה היא זהה, למעט התנגדות מכוילת משתנה (או הולכה משתנה) שמחליפה את האלקטרודות והעור. בכל לולאה, מגבר זרם למתח מייצר מתח פרופורציוני לזרם שעובר בלולאה שלו.

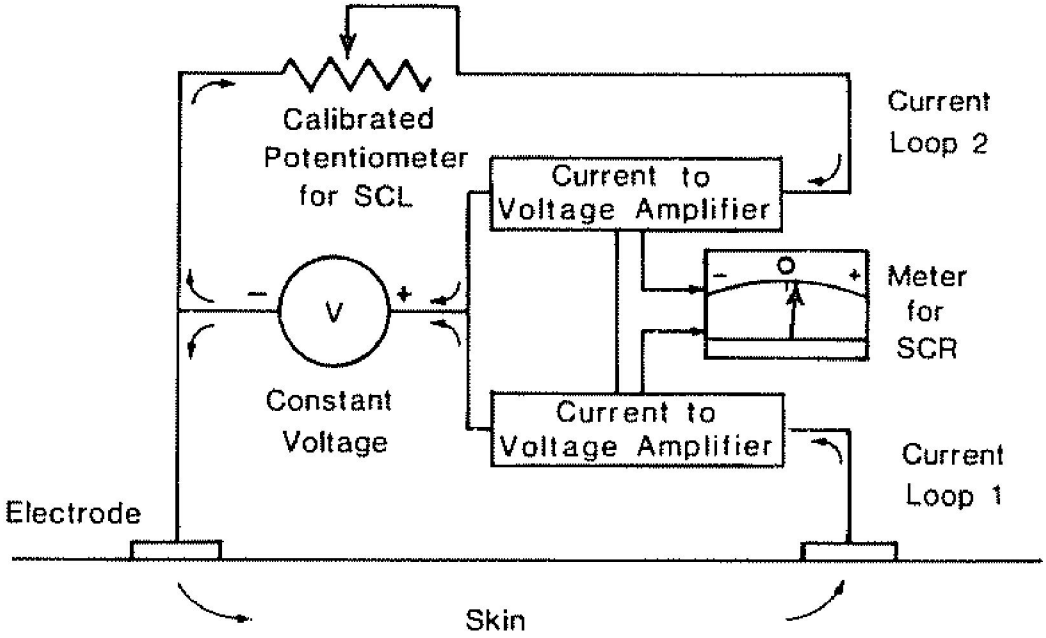
כאשר מעבר הזרם דרך הלולאות שווה, תפוקות המגברים שוות. כאשר מעבר הזרם אינו שווה, תפוקות מגברי הלולאות אינן שוות בפרופורציה להפרש בין הזרמים העוברים בלולאות. מונה מודד את ההפרש בין שתי תפוקות מגברי הלולאות. למונה זה מחוון הנמצא בדרך כלל במצב מנוחה במרכז הסקאלה, כאשר הוא מצביע על אפס. כאשר עובר זרם שווה בלולאות, תפוקות המגברים שוות, והמחוון נותר במצב מנוחה במרכז, כאשר הוא מצביע על אפס. כאשר זרם לא שווה עובר דרך הלולאות, יתנדנד המחוון ימינה או שמאלה, בהתאם ללולאה בה הזרם גדול יותר. מידת הסטייה מעידה על גודל ההפרש במעבר הזרם בלולאות ונמדדת באחוזים. המונה מודד רק ***הפרשים*** במעבר הזרם בשתי הלולאות.

כדאי לשים לב לדמיון בין מעגל זה למגבר הדיפרנציאלי הנידון בחלק ה-EMG.

המשתמש מכוונן את הבקרה (המוליכות המשתנה) כך שהמונה מתאזן בנקודת האפס שלו. משמעות הדבר היא שהזרם הזורם דרך הלולאות שווה. מכאן שערכי המיקרו-מו המוגדרים על הבקרה שווים ל- SCLשל הנבדק. כעת נניח שמגיע SCR. מוליכות העור עולה, אבל הבקרה המכוילת נשארת באותו מצב (כלומר בערך השווה ל-SCL הקודם). מאחר ומוליכות העור אך זה גברה מרמתה הקודמת, הזרם הזורם בלולאות כבר אינו שווה, והמחוון יסטה לימין בהתאמה לעצמת ה- SCR. המחוון מצביע על שיעור העלייה מעבר ל-SCL המופיע על הבקרה המכוילת. כשמתחילה התאוששות מה- SCR , המחוג יחזור למצב האפס, המציין שזרמי הלולאות השתוו.

כך משונע חשמלית חלון התצפית לאורך רצף ה SCA כדי להתאים עצמו לרמה התחילית של כל נבדק ונבדק. שינוי רוחב החלון מתאפשר חשמלית ע"י שינוי "תוספת" הזרם או רגישות מגברי הזרם-למתח, כך שעבור הפרש נתון של זרם בלולאה יביא ליותר או פחות סטיות מחוון. מטעם זה מכונה מתג רוחב החלון בדרך כלל "בקרת רגישות", למרות ש"בקרת רזולוציה" היא אולי הגדרה נכונה יותר. ביו-פידבק קולי עוקב אחר SCR בנועו במקביל לחלון התצפית.

הפסקה הקודמת מדגימה את התכנון הבסיסי. סינון או החלקה יכולים לסייע בצמצום הצורך לתקן ידנית את מצב חלון התצפית כאשר SCA נסחף לרמה תחילית של SCL השונה מאד מקודמתה (סינון והחלקה נדונו בסעיף ה-EMG).



תרשים 4.34 מכשיר הולכת עור עם חלון תצוגה מתכוונן

מכשירי SCR פשוטים

מכשירי SCR פשוטים עושים שימוש בכוונן ידני, לא מכויל לרמה תחילית ומשוב של SCR באמצעות קול או סקאלת מדידה לא מכוילת. המכשירים האלה אינם מכמתים SCL או SCR והם יותר מועדים לתופעות לוואי מאשר מכשירים משוכללים. למרות זאת, הם נחשבים לנוחים מאד ומספקים מידע על דפוסי SCR של אנשים.

לדוגמא, עליה וירידה של צליל צופנת בחובה הרבה מאד מידע על תגובה במצבי אמת, אפילו בהעדר נתונים כמותיים של SCL ו-SCR. למכשירים אלה יתרון ייחודי באשר לשימוש אמבולטורי בחיי היומיום. מזעור, אלקטרודות-אצבע יבשות (אינן מצריכות שימוש בג'ל), ואוזניות לפידבק פרטי (לאוזני המשתמש בלבד) מאפשרים שימוש נוח בזמן ביצוע פעילויות רבות כגון שיחה, הליכה, נהיגה, שימוש בטלפון, כתיבה, חשיבה, קריאה, ועוד ועוד פעילויות יומיומיות אמיתיות. בכך מושגת תובנה שלדפוסי תגובה בתנאי אמת שלא ניתנים לבדיקה בסביבת המעבדה. זו דרך מצוינת לאדם (כולל מטפל!) לגלות דפוסי תגובה שלו/ שלה. בכל אפליקציה על המטפל לספק הדרכה הולמת באשר לשימוש ולמגבלות של המכשיר ופירוש התוצאות המתקבלות.

תופעות לוואי

יש דרכים רבות לעבד ולהציג SCA, ואין מוסכמה ברורה על הדרך הנאותה ביותר לבצע זאת. הסטורית, השיטה הנפוצה ביותר היא קרוב לוודאי זו המוצגת בתרשים 4.34, עם בקרה מכוילת ידנית של הרמה התחילית ושעון תצוגה אנלוגי עם אפס במרכז עבור SCR. למכשירי SCR פשוטים מקום נכבד בביו-פידבק קליני, למרות שהם לא מסוגלים לספק מידע כמותי על פי רוב. הנושאים הבאים העוסקים בתופעות לוואי חשובים לגבי כל מכשיר SCA.

גודל אלקטרודה. אלקטרודות בגדלים שונים יגרמו לשינוי בתוצאות המדידה. אלקטרודה גדולה יותר מכסה שטח עור גדול יותר ולפיכך כוללת יותר בלוטות זיעה בלולאת הזרם. כתוצאה מכך נמדד SCL גבוה יותר באלקטרודות גדולות מאשר באלקטרודות קטנות המכניסות מספר קטן יותר של בלוטות זיעה ללולאת הזרם. לכן יש לבחור אלקטרודות בגודל סטנדרטי כדי להבטיח שתוצאות כמותיות של SCL תהינה ברות השוואה.

תזוזה. מאחר וגודל האלקטרודה משפיע על SCA, כל דבר המשנה את שטח המגע האפקטיבי של האלקטרודה יגרום לשינוי אף הוא של SCA. תזוזה של האצבעות או היד תגרום לשינוי לחץ בנקודת המגע. האלקטרודה עשויה להתרומם קלות ולהקטין את שטח המגע, או להילחץ חזק יותר אל העור ולהגדיל בכך את שטח המגע. השפעת תופעות אלה מודגשת יותר בשימוש באלקטרודות יבשות מאשר באלקטרודות מתכת-אצילה המצריכות שימוש בג'ל. על המטפל להדריך את הנבדק להגביל את תנועותיו ולארגן את האלקטרודות והכבלים כך שיהיו במצב יציב יחסית. כאשר לא ניתן למנוע את תנועת היד (למשל ביצוע מעקב כאשר הנבדק מבצע פעולות בשתי ידיו), ניתן להשתמש בבהונות הרגלים כאתר חלופי. מצב זה ידרוש מחקר על נורמות חדשות ל SCL-ו SCR-באתרים אלה. למרבה המזל, הפרעות עקב תזוזה קלות יחסית לזיהוי, משום שהדפוסים המתקבלים הם בדרך כלל פתאומיים ולא אופייניים לדפוסים אמיתיים של SCA, ומשום שתזוזה ניתנת בדרך כלל להבחנה בעין.

מצב העור. מצב העור יכול גם הוא להשפיע על מדידות מוליכות. לדוגמא, אם לאדם יש שפשוף או חתך טרי החודר מבעד לפני העור בעלי ההתנגדות הגבוהה, ייתכן שייווצר נתיב הולכה טובה מהאלקטרודה לשכבות התחתונות של העור ולגרום ל SCL גבוה יותר. אם לאדם יש יבלת, עובי ויובש שכבת ההתנגדות הגבוהה גדלים, ומביאים ל-SCL נמוך בהרבה ומשרעת SCR מוקטנת. (Christie, 1980 & Venable) מציינים ש-SCL יורד משמעותית לאחר רחצה בסבון ומים, שבן מלח שיורי מוסר. מאחר ומלח מצטבר לאורך זמן בין רחצה לרחצה, הם ממליצים על רחצה לפני תחילת המדידה. החשיבות של הרחצה לצורכי ביו-פידבק קליני אינה ברורה, אבל מה שכן ברור הוא שהנוהל לא מבוצע באופן אוניברסאלי.

טמפרטורת החדר. יש ממצאים (Christie, 1973,1980 & Venables) המעידים על כך ש SCA מושפע מתחושת קור אצל הנבדק, ושתנאי חום מעל הממוצע השוררים בקליניקה מניבים לכאורה מה שמכונה תגובות יותר "נורמאליות". סביר להניח שתפקוד בקרת הטמפרטורה של הזיעה בחדר חם במיוחד מביא לעליות ב- SCL שאינן משמעותיות מבחינה פסיכו-פיזיולוגית.

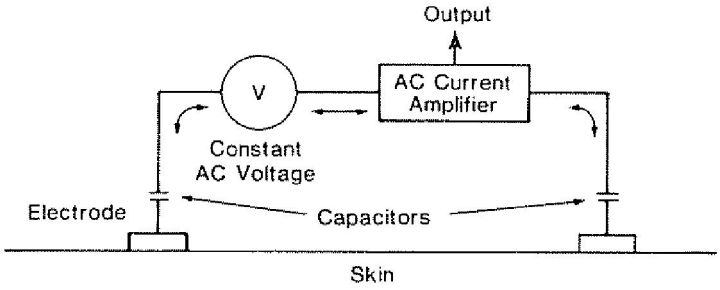
פוטנציאל קיטוב אלקטרודה ודגם האלקטרודה. השיטה האקסו-סומאטית כרוכה במעבר זרם דרך העור באמצעות אלקטרודות משטח. פוטנציאל קיטוב מתפתח על פני ממשק העור עם האלקטרודה בעת מעבר זרם ישר, ואפקט הקיטוב מצטבר עם הזמן. מידת פוטנציאל הקיטוב משתנה ולא ידועה. יחידות EDA היו שונות מהותית זו מזו ברמת החשיפה שלהם לאפקטים של קיטוב האלקטרודות. אבל כללית, ניתן לומר שזו אינה בעיה חמורה, במיוחד עם מכשירי זרם ישר המעבירים זרמים נמוכים מאד לעור. למרות האמור, מטפלים בביו-פידבק המעוניינים ב EDA והמכשירים ששימשו כדי להעריך אותו במהלך השנים צריכים קרוב לודאי להיות מודעים לבעיות הנוגעות לקיטוב אלקטרודות ולשיטות הנקוטות כדי לצמצמן. להלן דיון טכני במידת מה בעניין זה.

אלקטרודות יבשות משמשות לעתים קרובות לצרכי EDA. הן עשויות מחורים שונים, כולל עופרת, אבץ, כרום, פלדה, זהב, או שבבים מצופי כסף (silver-coated fuzz), המאובטחים בדרך כלל ברצועות וולקרו (סקוטש נצמד) הניתנות להתאמה למידות אצבע שונות. הן פשוטות , זולות, ונוחות יותר מאשר אלקטרודות כסף/כסף/ כלוריד, במיוחד לצורכי שימוש קליני. ואולם, כאשר הן מותקנות בציוד EDA עם זרם ישר, האלקטרודות היבשות הפשוטות סובלות מפוטנציאל קיטוב בדרגות שונות.

כאשר ממשק העור-אלקטרודה מקוטב הוא מתנהג כסוללה זעירה הנטענת על ידי הזרם העובר דרכה. מתח קיטוב נוסף (או מופחת) לפיכך למתח הקבוע המסופק על ידי המכשיר. מכיוון שפוטנציאל הקיטוב (מתח) הוא משתנה, המתח בלולאת הזרם אינו קבוע יותר. לפיכך מה שנראה לכאורה כשינוי ב-SCL עשוי להיות בחלקו ביטוי לפוטנציאל הקיטוב המשתנה של האלקטרודה. סחף ברמת מוליכות העור בשל הצטברות פוטנציאל הקיטוב באלקטרודות גורם אמנם להפרעת רקע, אבל האפקט הזה יכול גם להיות שולי, לצרכים פרקטיים. למרות האמור לעיל אלקטרודות כסף-כסף –כלוריד עדיין נמצאות בשימוש, משום שהן נוטות לפתח פוטנציאל קיטוב מינימאלי, ולפיכך גם טעויות קיטוב מינימאליות. אבל הן יקרות יותר ופחות נוחות לשימוש מאלקטרודות יבשות, והג'ל המשמש אותן עלול להאריך את שלב ההתאוששות של ה-SCR. הארכה דומה עלולה לקרות התנאי אקלים לח

אפילו כשמשתמשים באלקטרודות יבשות. הארכה מלאכותית של התאוששות מ-SCR יכולה להביא לתוצאות שיפורשו בטעות כ "טיפוס מדרגה".

שימוש בזרם חילופין לוויסות תופעת קיטוב האלקטרודות. המכשירים פותחו כך שיוכלו לעקוף את האפקטים של פוטנציאל הקיטוב. הדרך הברורה ביותר לצמצום הפרעת קיטוב האלקטרודות במכשירי EDA היא להשתמש במקור מתח חילופין במקום המתח הישר כפי שתואר לעיל. השימוש במתח חילופין בלולאת הזרם מסייע בשני אופנים: ראשית, הקוטביות המשתנה תמידית של מתח החילופין טוענת ופורקת את "סוללת" ממשק האלקטרודות-עור, ובכך מקטינה את הצטברות קיטוב המתח. שנית, כך מתח קיטוב שיורי נחסם על ידי קבלים בלולאות הזרם. קבלים מאפשרים מעבר למתח חילופין בלבד, כפי שמתואר בתרשים 4.35 .



תרשים 4.35 לולאת זרם של מתח חילופין עם קבלים לחסימת מתח ישר.

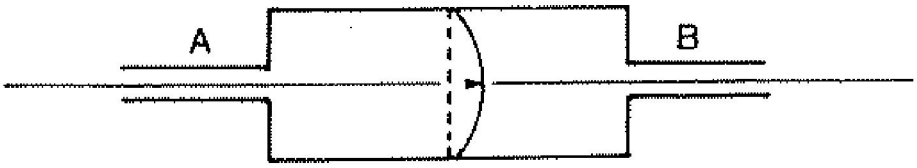
"קבל" הוא רכיב חשמלי בעל לוחות מוליכים המופרדים באמצעות ממברנה של חומר מבודד. מטענים משתנים של דחייה ומשיכה לאורך הממברנה המבודדת מאפשרים לזרם החילופין לעבור דרך קבל. למעשה שום זרם לא עובר דרך הממברנה. אפשר להמחיש זאת בעזרת אנלוגיה. נדמיין צילינדר מלא בנוזל, מצויד בדיאפרגמה אלסטית במרכז ופתח בכל קצה (תרשים 4.36). אם לחץ הנוזל בפתח A גדול יותר מאשר בפתח B, נוזל זורם אל תוך הצילינדר ב- A ומנפח את הממברנה, וכתוצאה מכך דוחף נוזל החוצה דרך פתח B. אם הלחץ פוחת, הממברנה מתחילה לחזור למצבה המקורי, כאשר נוזל חוזר אל הצילינדר דרך פתח B ואותה כמות נוזל עוזבת דרך פתח A. אם הלחץ ב- A ממשיך לרדת, יותר נוזל עוזב דרך פתח A; הממברנה מתנפחת שמאלה ומושכת נוזל אל תוך הצילינדר דרך פתח B. כל עוד יש מחזור שינויי לחץ ב-A, יהיה בהתאמה מחזור שינויים ב- B. בהקבלה, כך הקבל מעביר זרם חילופין. עם זאת, נניח שיש לחץ מתון בלתי משתנה ב-A. הממברנה מתנפחת מעט ואז נעצרת. נוזל זורם מ-A רק כאשר הלחץ מצטבר והממברנה בתנועה. לאחר שהיא נעצרת במצב נפוח, אין יותר תנועת נוזל ב-B. בהקבלה, כך הקבל חוסם זרם ישר.

אנלוגיה זו מדגימה כיצד קבל חוסם פוטנציאל קיטוב של זרם ישר שיורי בלולאת זרם חילופין, תוך העברת זרם החילופין ללא הגבלה. החסימה על ידי הקבל מבטלת הפרעות פוטנציאל קיטוב, אך עם זאת, יוצרת הפרעה מסוג אחר המהווה בעיה גדולה אף יותר. מסתבר שהעור עצמו פועל כקבל. אף שלעובדה זו אין השלכות כאשר משתמשים במתח קבוע של זרם ישר כפי שתואר בדוגמאות קודם לכן, היא מהווה גורם משמעותי כאשר משתמשים בזרם חילופין. תרשים 4.37 מדגים את מיקום הקבל הטבעי הזה.

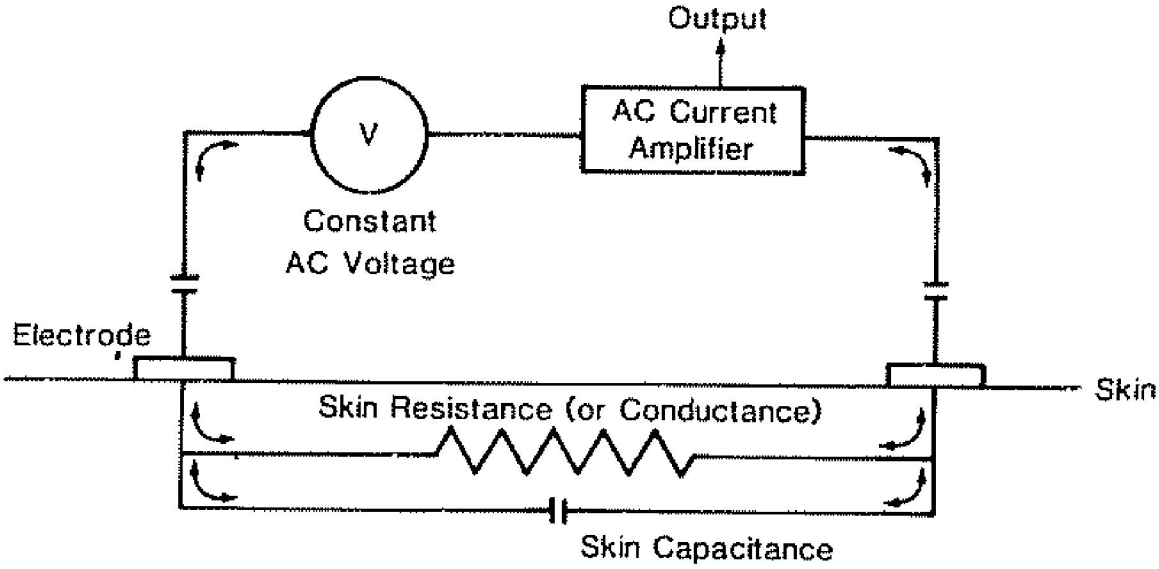
קיבוליות של העור יוצרת מסלול "ריאקטיבי" שני לזרם חילופין בלולאת הזרם. אם מופעל על העור זרם חילופין, חלק מהזרם זורם כרגיל דרך ההתנגדות המופחתת של בלוטות זיעה פעילות, אך זרם נוסף זורם דרך קיבוליות העור. המשמעות היא שסך כל זרימת הזרם גדולה יותר (והקריאה מראה תוצאת SCL גבוהה יותר). אפקט זה עשוי להיות בולט מאד ואין להתעלם ממנו. הערה לאלו מאיתנו בעלי נטייה טכנית – על מדידת זרם חילופין שבה קיבוליות של העור תורמת לקריאה להיות מכונה "עכבה של העור" (skin Impedance, מקביל להתנגדות) או "הכנסה של העור" (skin admittance, מקביל להולכה).

מה שמסבך את הדברים אף יותר, עכבה או הכנסה משתנות עם תדירות זרם החילופין, מפני שתדירויות גבוהות יותר עוברות דרך הקבל ביתר קלות בהשוואה לתדירויות נמוכות יותר. אל דאגה, יש דרכים אחרות למזער הפרעת קיטוב ללא יצירת הפרעת קיבוליות אך הסבר מערכות אלה הינו מעבר להיקף הפרק הזה. מערכות כאלו זמינות באופן מסחרי וממזערות הפרעות אלו גם כאשר נעשה שימוש באלקטרודות יבשות פשוטות. קונה נבון המוטרד מנתוני SCL כמותיים חוזרים יחקור כיצד מתמודדים או נמנעים מהפרעות אלו.

באשר למכשירי ה- SCR המזעריים שתוארו קודם לכן, היעדר (יכולת?) הכימות שלהם מפחית מרלוונטיות הפרעות הקיטוב במידה משמעותית בהשוואה למכשירים המאפשרים כימות. הפרעות קיבוליות של העור בדרך כלל אינן מהוות גורם חשוב בעת השימוש במכשירים מזעריים, מאחר והם כמעט תמיד משתמשים בלולאות זרם ישר פשוטות.



תרשים 4.36 אנלוגית נוזל לקבל



תרשים 4.37 לולאת זרם חילופין וקיבוליות העור

בטיחות

אמצעי הזהירות עבור מכשירי SCA זהים לאמצעי הזהירות עבור מכשירי EMG. שניהם מחוברים חשמלית לנבדק דרך אלקטרודות; לכן יש לציית לאותן תקנות מחמירות בנוגע לעיצוב, ייצור, התקנה ותחזוקה של מכשירי SCA ו- EMG, ובנוגע לכלל ההתקנה שכוללת מכשירים אלה. מעבר זרם ישר מאלקטרודה לעור לאורך זמן ממושך עלול להוביל ליצירת תוצרי לוואי כימיים על העור אם נפילת המתח על פני העור עולה על 3DC volts, כפי שעשוי להתרחש בדגמי "צעצוע" או דגמים מוקדמים מאד של אביזרי EDA (Leeming, Ray, & Howland, 1970)

אפקט זה בדרך כלל זניח, אך אם הזרם שהועבר גבוה מספיק ונמשך זמן ארוך מספיק, עלול להתפתח גירוי של העור. לא סביר שאפקט זה יחול במכשירים מודרניים למדידת הולכה של העור, אך יחידות ישנות מאד, כאלו שיוצרו כחידושים או צעצועים, או אלו שפיתחו זרמי דליפה, סביר יותר שיפתחו אפקט זה. ככלל אצבע, מכשיר שמעביר זרם של 10 מיקרו אמפר ומטה לסמ"ר של משטח אלקטרודה בלולאת הזרם שלו, ופועל על העור מתחת ל- 3 וולט זרם ישר לא יוביל להצטברות כימיקלים הגורמים לגירוי העור.

הכרת תודה

תודתי נתונה ל- Wallace A. Peek זכרו לברכה, Roland E Mohr זכרו לברכה, ו-John B Piccluottino , אשר פעלו בנדיבות רבה כמנטורים שלי לתכנון. תודה מיוחדת ל- John B Piccluottino , אשר הצעותיו לפרק זה במהדורה הראשונה סיכמו היסטוריה ארוכה ומוערכת ביותר של תועלת לפרויקטי ביו-פידבק. תודה מיוחדת שמורה ל - Mark S Schwartz שבלעדי התלהבותו המהדורה הראשונה של הפרק והתיקונים שבאו בעקבותיה היו נותרים ללא ספק ברשימת המשימות שאני מתעתד לעשות מתישהו בעתיד.

סימוכין

Boucsein, W. (1992). *Electrodermal activity* New York: Plenum Press

Brown, B. (1974) *New mind, new body: New directions for the mind*. New York: Harper *&* Row

Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (Eds.) (2000) *Handbook of psychophysiology* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press

Dawson, M. E., Schell, A. M., & Filion, L. (2000) The electrodermal system In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary & G. G. Berntson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press

Jennings, J. R. Tahmoush, A. J., *&* Redmond, D. D. (1980) Non-invasive measurement of peripheral vascular activity. In I. Martin & P. H. Venables (Eds.), *Techniques in psychophysiology* (pp. 70-131). New York: Wiley.

Leeming, M. N. Ray, C., & Howland, W. S (1970) Low-voltage, direct-current burns. *Journal of the American Medical Association*, *214(9),* 1681—1684.

Mathieu, P. A., & Sullivan, S. J. (1990). Frequency characteristics of signals and instrumentation: Implication for EMG biofeedback studies. *Biofeedback and self regulation, 15(4), 335-352*

Neumann, E., & Blanton, R. (1970). The early history. of electrodermal research *Psychophysiology,* 8(4), 463— 474

Otis, J., Rasey H. Vrochopoulos, *S.* Wincze. J. & Andrasik, F. (1995) Temperature acquisition as a function of the computer-based biofeedback system utilized: An exploratory analysis *Biofeedback and Self-Regulation.* 20(2), 185-190.

Stern, R. M., Ray, W. J., & Quigley, R. S. (2001) *Psychophysiological recording* (2nd ed.). New York: Oxford University Press

Toomin, M. & Toomin, H. *(1975,* February). *Psychological dynamic Correlates of the paradoxically invariant of the GSR.* Paper presented at the Fifth Annual Convention of the Biofeedback Research Society, Monterey, CA

Venables, P. H., *&* Christie, M.J. (1973) Mechanisms, instrumentation, recording techniques, and quantification *of responses* In W. F. Prokasy *&* D. C. Raskin (Eds.). *Electrodermal activity in psychological research.* New York: Academic Press.

Venables, P. H., *&* Christie, M.J. (1980). Electrodermal activity. In I. Martin & P. H. Venables (Eds.), *Techniques in psychophysiology* (pp. 3-67). New York: Wiley.