

## Dynamische Analyse und Simulation von Seil-Stab-Strukturen von Seilbahnen auf Basis diskreter Darstellung und sukzessiven Approximationsalgorithmus

Die Bedeutung und die Aktualitaet der dynamischen Analyse von Seilbahnen wird vor allem durch die Entwicklung des technischen Fortschritts in den letzten Jahrzehnten sowie durch den Ausbau und den Einsatz der neuen Seilbahnsysteme und entspraechenden Seil-Stab-Strukturen erhoeht. Das sind: erhoehte Geschwindigkeit und Masse der Seilbahnen, deren Laenge, die Faehigkeit Netzwerke zu schaffen (Verzweigungen an Seillinien, Automated People Mover), erweitere und neue Anwendungsgebiete.

Die von uns entwickelte Methode, die auf der diskreten Darstellung von Seil- Stab-Systemen und speziellen Rechnungsalgorithmen basiert, welche wir anfangs fuer die Berechnung der Statik der Seilbahnen verwendet haben, wurde weiterentwickelt und fuer die Simulation (Modellierung) und fuer die Berechnung der Dynamik der Seilbahnen entwickelt und vorgeschlagen. [1-3]

Die Idee des Ansatzes werden wir am Beispiel der Berechnung der Dynamik eines durchhaengenden Seils darstellen (Abb.1,2).

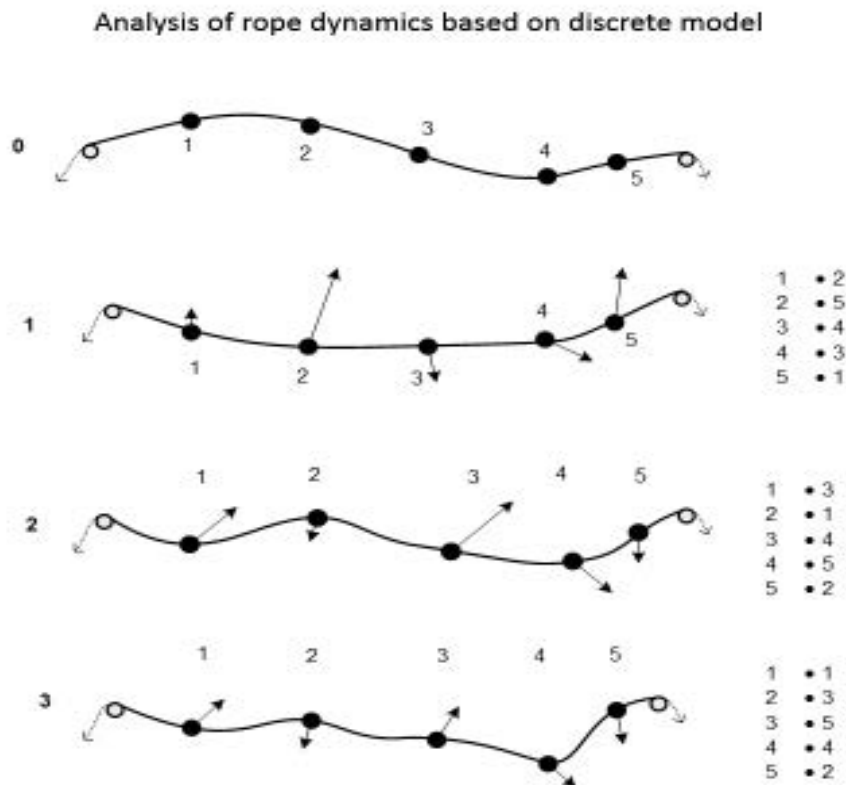


Abb.1 Berechnung der Dynamik des Seiles bei diskrete Darstellung

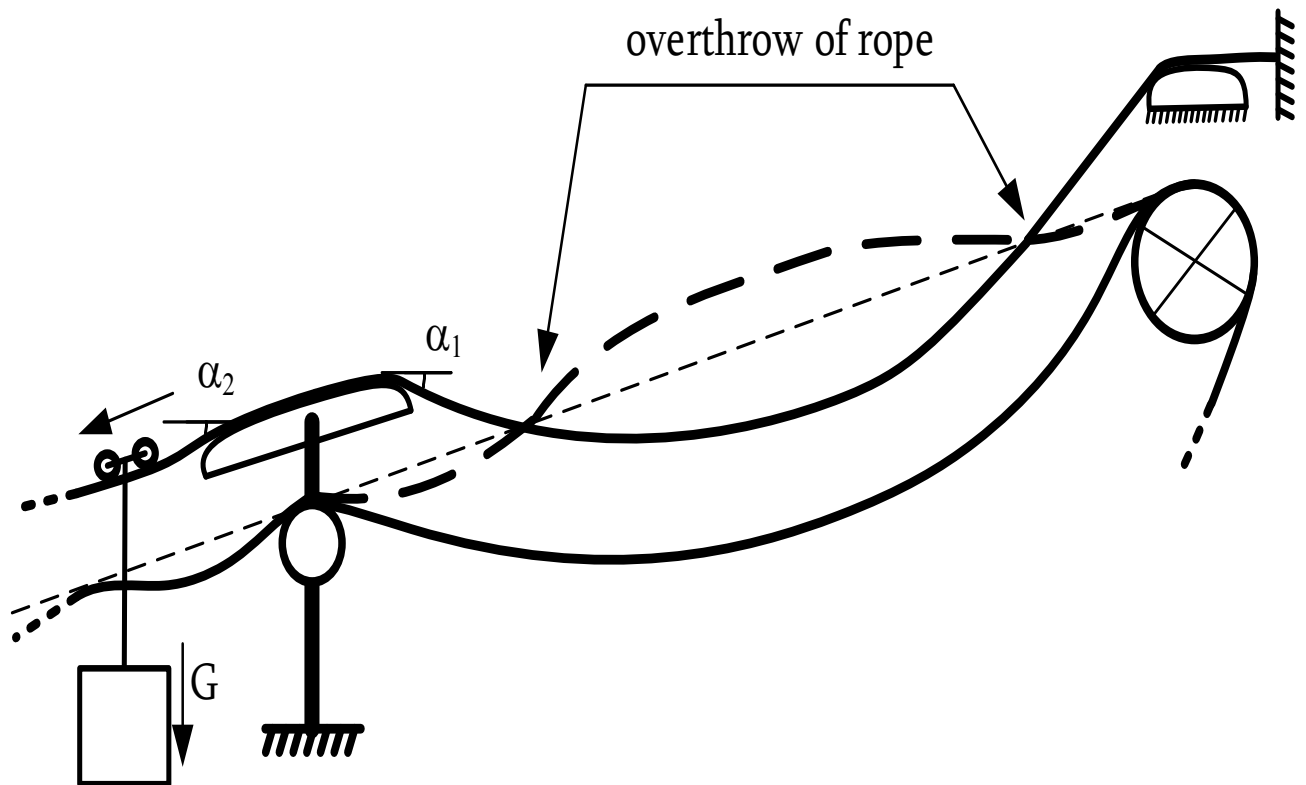


Abb.2 Schematische Darstellung des Seilueberwurfes

In der Ausgangsposition (0) unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen und der äußeren Einflüsse (wie Schwerkraft, Windkraft etc.) für jeden Knoten (Punktmasse) werden die Gesamtkraft und Beschleunigung berechnet und entsprechend der Größe des Moduls geordnet (1).

Dann bearbeitet das Rechenprogramm jeden Knoten nacheinander. Es werden die Knoten in die Richtung der Gesamtkraft für eine sehr kleine vordefinierte Zeitspanne separat verschoben. Dabei wird mit dem „klügsten“ Knoten (der am schnellsten ist) angefangen, in absteigender Reihenfolge konsequent bearbeitet und mit dem „faulsten“ Knoten beendet, bis eine bestimmte vorgegebene Genauigkeit erreicht wird (siehe dieselben Figurenpositionen (2), (3) , ...).

Als wichtiges Merkmal des oben beschriebenen Ansatzes ist festzuhalten, dass der Algorithmus nicht alle Knoten gleichzeitig bearbeitet (parallel, wie es z.B. bei der Anwendung der Methode der finitn Elemente der Fall ist), sondern nur einen davon. Das gestattet den Rechnungsvorgang relativ einfach zwischen den Computern in enem lokalen Netzwerk oder in einem globalen Internet-Netzwerk zu verteilen und zu realisieren.

Die Zuverlaessigkeit und Genauigkeit des beschriebenen Ansatzes wurde zuerst durch Vergleich mit den so genannten klassischen Beispielen wie z. B. Schwingung einer Saite gepueft und untersucht. Nachher haben wir den Ansatz auch fuer die Untersuchung

der dynamischen Vorgaenge an einer Seilbahnen verwendet und geprueft, wobei die Ergebnisse eines einzigartigen Experiments verwendet wurden, welches an einer Pendelbahn in der Stadt Tirniauz (Russland) durchgefuehrt wurde.

Die Beschreibung dieses Experiments und die erzielten Ergebnisse werden hier erstmals veröffentlicht. Das Experiment wurde von den Mitarbeitern des Labors der Dynamik der Seilsysteme des Instituts für Bergbaumechanik (Tbilisi) der Akademie der Wissenschaften unter der Leitung des Laborleiters Dr. David Pataria mit aktiver Unterstützung und Mitarbeit des Seilbahnbesitzers, des Wolfram-Molybdän-Bergwerks in der Stadt Tirniauz (Nordkaukasus) geplant und durchgefuehrt. Der Gegenstand der theoretischen Untersuchungen und des Experiments war die von Ceretti und Tanfani erbaute Pendelbahn.

Hauptgrund und Motivation für die Durchführung der gruendlichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Dynamik der Pendelbahn war der Ueberwurf des Zugseiles ueber das Tragseil nach der Überfahrt des Wagens über die Stuetze N 1 waehrend der Talfahrt (Abb. 3a, 3b).

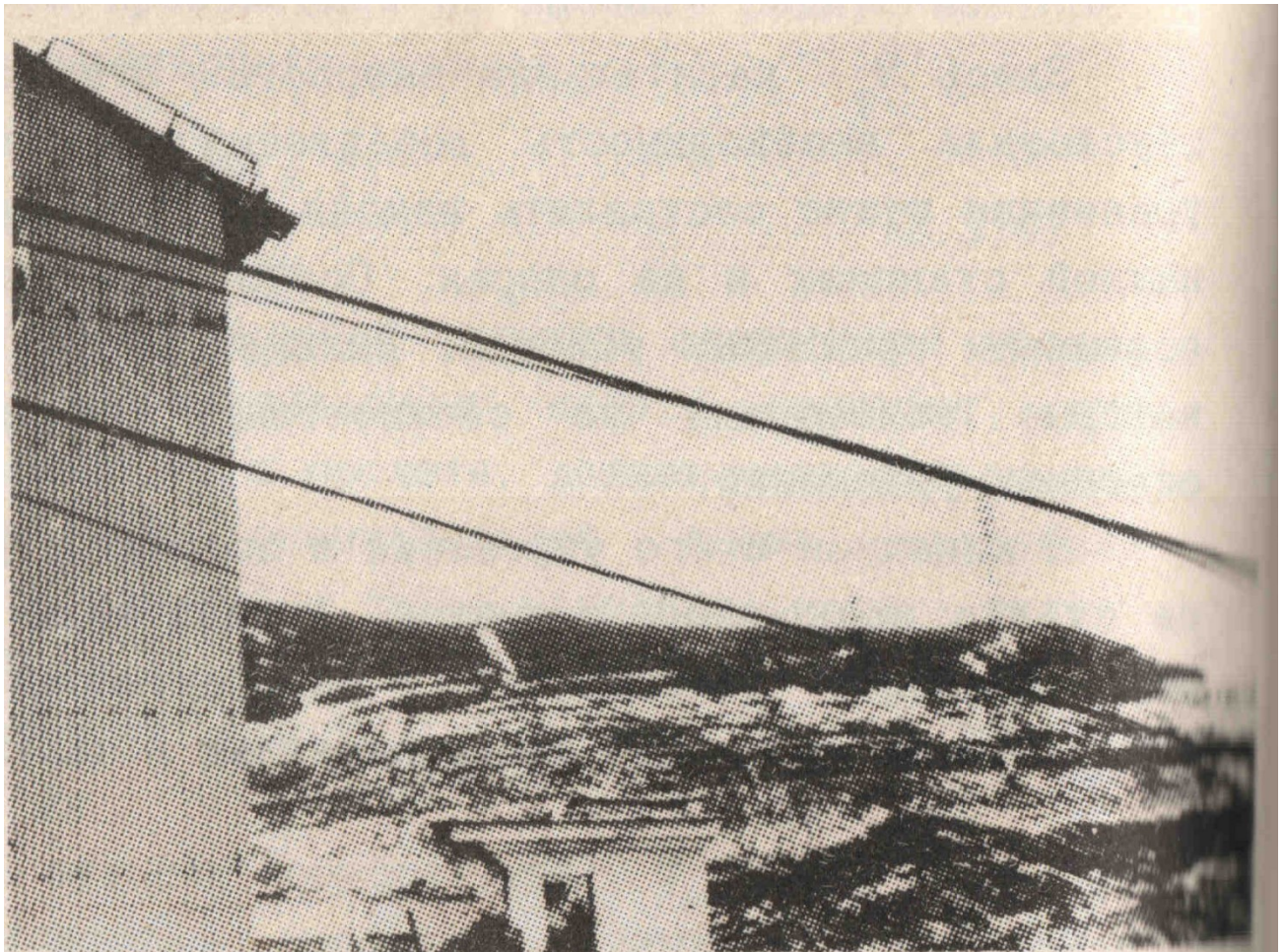


Abb. 3a – Seilueberwurf in der Natur (Tirniauz)



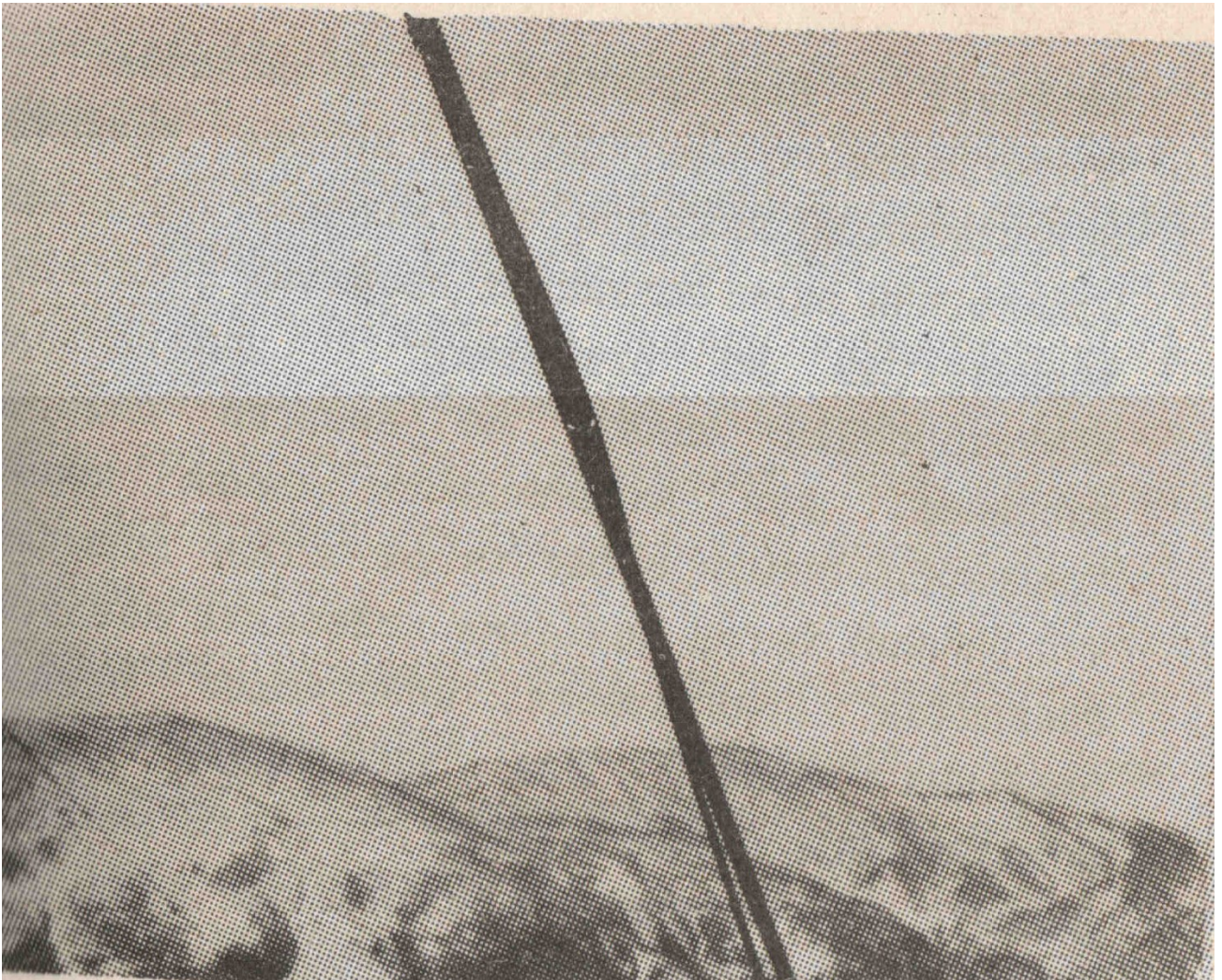


Abb. 3b – Seilueberwurf in der Natur (Tirniauz)

Laut dem Projekt sollte die Höchstgeschwindigkeit der Bahn 9 m / s, Wagenbelastung 80 Personen betragen. Nach der Inbetriebnahme wurde man wegen des Seilueberwurfs gezwungen, die Geschwindigkeit des Wagens auf 7 m/s und die Wagenbelastung auf 60 Personen zu begrenzen, wodurch die Foerderleistung der Bahn um 30% reduziert wurde.

Außer der Förderleistungsprobleme ist der Seilueberwurf wegen des Rutschens des Zugseils auf dem Tragseil mit dem großen Risiko der Beschädigung der Seile verbunden, welche eine aufwendige Reparatur und sogar Auswechselung der Seile verursachen kann. Wegen des Seilueberwurfs auf dieser Bahn wurde man gezwungen, die Seile durch neue zu ersetzen.

Das Schema der Seilbahn, die Lage der Beobachtungs- und Registrierungspunkte der Parameter während des Experiments zeigt Abb. 4.

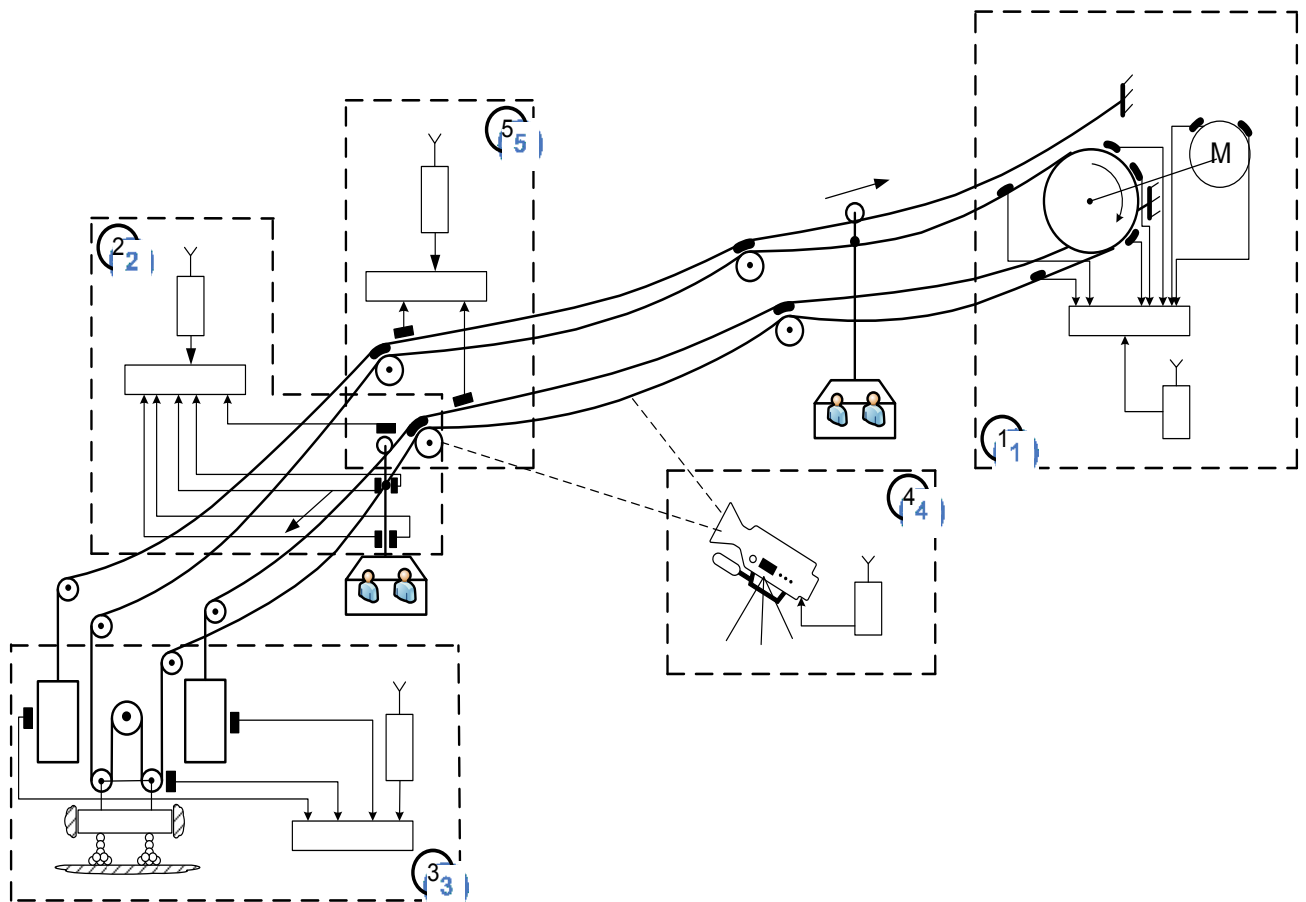


Abb.4 Schema des durchgefuehrtes Experiments

Die Hauptdaten der Seilbahn:

- Länge - 2200 m; Höhenunterschied - 370 m;
- Gewicht des leeren Wagens - 2600 kg;
- Gewicht des vollgeladenes Wagens - 9000 kg;
- Masse des Zugseils - 3,7 kg / m; Durchmesser - 31,5 mm;
- Masse des Tragseils – 31.5 kg / m; Durchmesser - 66 mm;
- Masse des Spanngewichtes des Zugseils - 23.000 kg;
- Masse des Spanngewichtes des Tragseils - 100.000 kg.

Während des Experiments unter Berücksichtigung der Betriebsinteressen (kurze Zeitspanne bei natürlichen Arbeitsunterbrechungen, Betriebssicherheit usw.) sind in 5 Beobachtungspunkte folgende Parameter gemessen und Registriert worden (Abb. 4):

- 1) In der Antriebsstation - die Spannkraft in Auflauf- und Ablaufstraenge des Zugseils, Lage (zurueckgelegter Weg) und Beschleunigung des Zugseils, Drehfrequenz der Antriebsscheibe, Spannung und Strom des Antriebmotors.
- 2) Im Wagen - der zurückgelegte Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Wagens, Spannkraft in beiden Straengen des Zugseiles.



- 3) In der Spannstation - die Lage der Spanngewichte der Tragseile und des Spanngewichtes des Zugseils.
- 4) Schwingungen des Trag und-Zugseiles im zweiten Spannfeld, wo der Seilueberwurf zu erwarten ist (Videoaufnahme);
- 5) Bewegung des Tragseiles entlang des Schuhs auf Stütze 1.

Für die Zwecke des Experiments wurden speziell entwickelt und dann als Originalprodukte patentiert: elektronisches Messgeraet des zurueckgelegten Weges des Wagens, Messgeraet der Spannkraft im Zugseil, Steuerungssystem fuer Gewaehrleistung der synchronen Aufzeichnungen in allen 5 Registrierungspunkten. Die Vorbereitung der Methodik und der technischen Mittel des Experiments dauerte mehr als eineinhalb Jahre. Das Experiment selbst, einschließlich der Kalibrierungstests, wurde in nur 4 Tagen durchgeführt. In Abb. 5 bis 7 werden Aufzeichnungen einzelner Parameter gezeigt, die während des Experiments registriert worden sind.

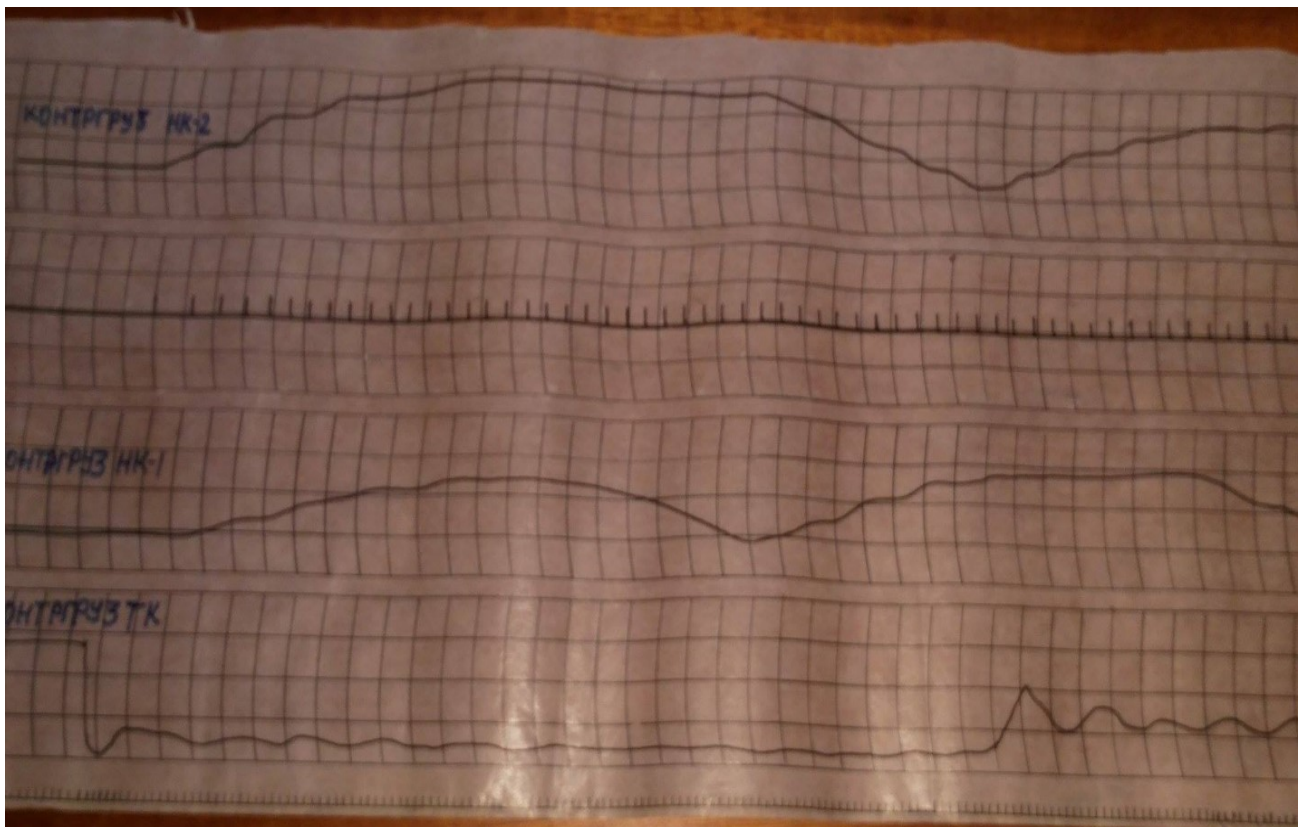


Abb.5 Aufzeichnung der Bewegung der Spanngewichte

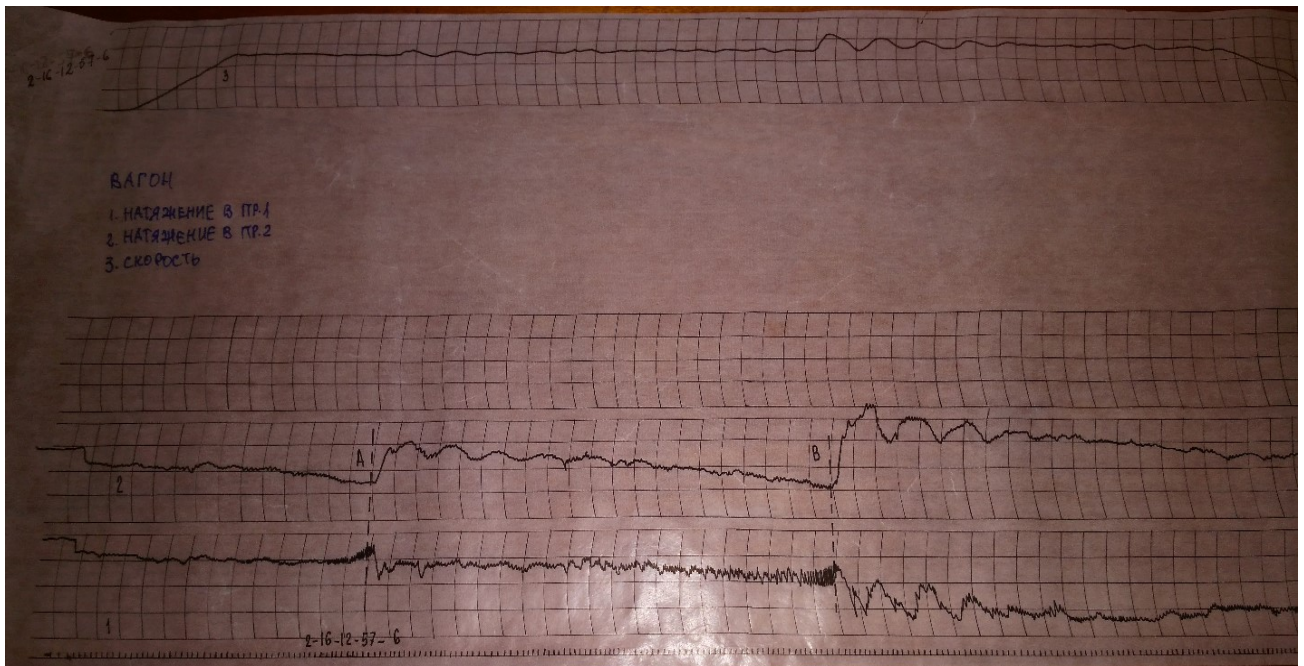


Abb.6 Aufzeichnung der Spannkraft im Zugseil und der Fahrgeschwindigkeit

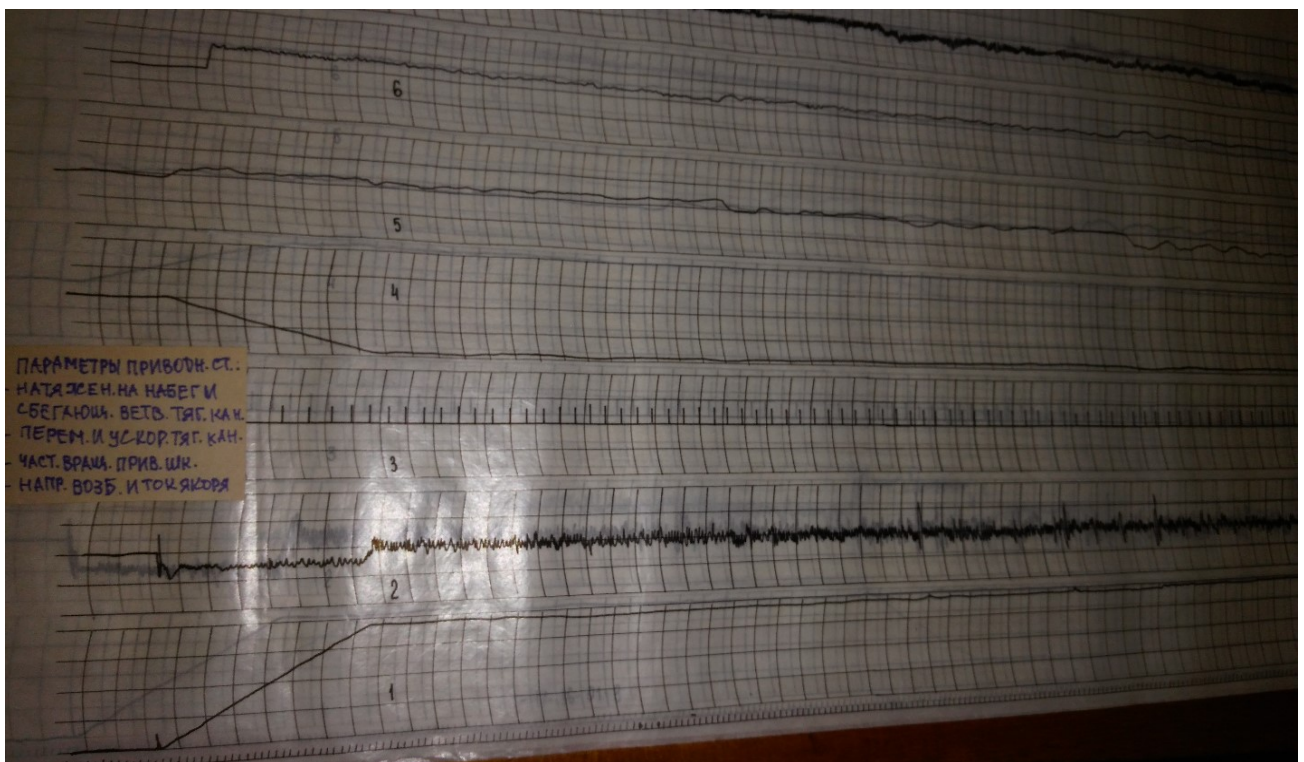


Abb.7 Aufzeichnung der Parameter an der Antiebsstation



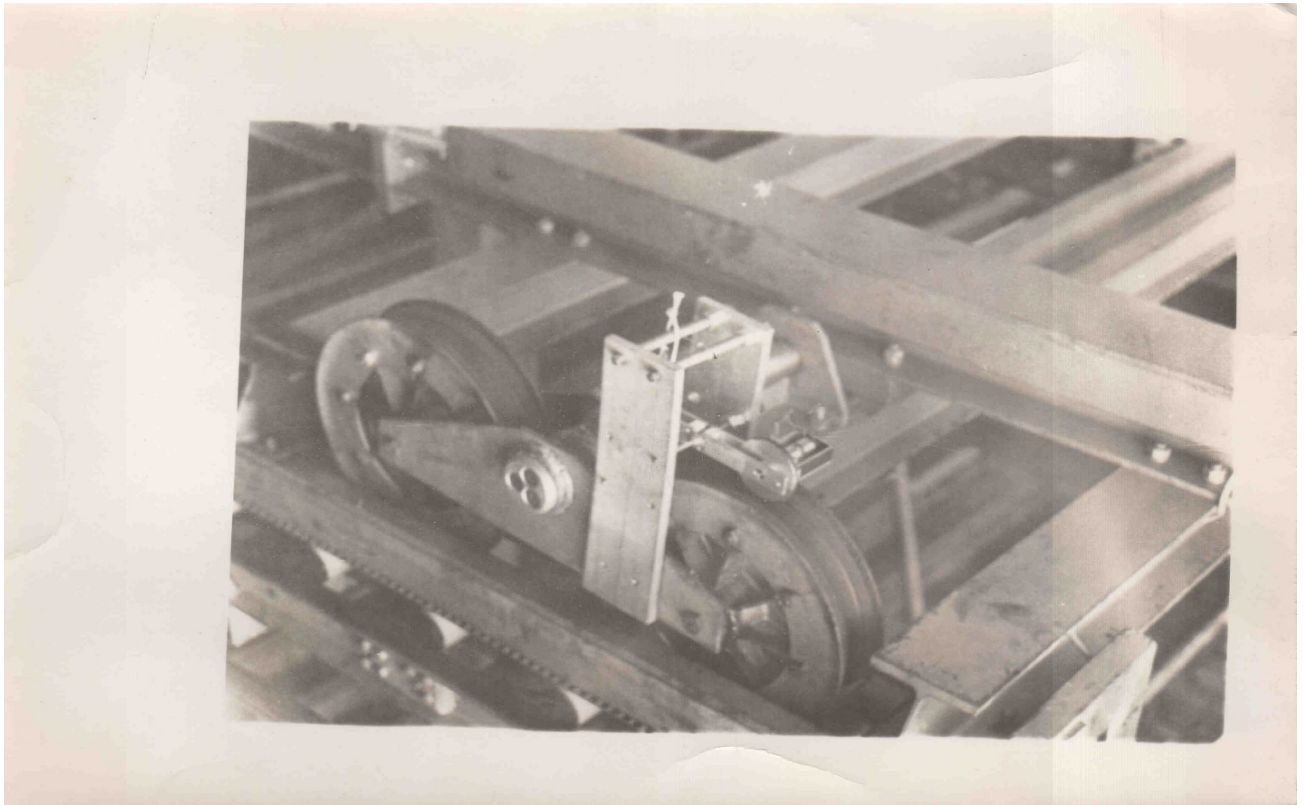


Abb.8 Messung der Parameter am Laufwerk des Wagens

Zum Schluss. Die an der Seilbahndynamik durchgeführte Arbeit ermöglicht uns, einige wichtige Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu machen:

Im Unterschied zu anderen bekannten Methoden ist es in unserem Fall nicht notwendig, Gleichungssysteme zusammenzustellen und zu lösen - das diskrete Modell des zu untersuchenden Körpers (in unserem Fall des Seils) wird durch einen von uns entwickelten speziellen Algorithmus verarbeitet und transformiert. (Das Prinzip haben wir am Anfang erläutert)

Als Ergebnis erhalten wir die über die Zeit dargestellten geometrischen und physikalischen Parameter des Seiles, welches nichts anderes als das Ergebnis der Lösung der entsprechenden Gleichungssysteme im Falle des klassischen Ansatzes ist.

Der entsprechende Algorithmus für statische Probleme wurde bereits ausführlich in einem Bericht beschrieben, der auf dem O.I.T.A.F.-Kongress in Rio de Janeiro, 2011, von uns vorgetragen wurde.

Das wichtigste Ergebnis dieser Arbeit kann wie folgt zusammengefasst werden: Der vorgeschlagene Ansatz, der auf der digitalen Darstellung des Seiles und eines speziellen Rechenalgorithmus basiert, ermöglicht in für die Praxis ausreichender Genauigkeit die



Berechnung und Modellierung der dynamischen Prozesse des Seiles, welche beim Betrieb einer Seilbahnen auftreten.

Das beschriebene Experiment, welches speziell in realen Bedingungen durchgeführt wurde, bestätigt die Angemessenheit (adequacy) und praktische Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes – der Unterschied zwischen der theoretischen (rechnerischen) und experimentellen Ergebnisse ist kleiner als 10 %.

Von den vorgeschlagenen Schlussfolgerungen und Empfehlungen ist zu nennen: Nach der Standardbetriebsvorschrift war bei Überfahrt der Stütze die Verminderung der Geschwindigkeit von 9 m/s auf 7 m/s vorgeschrieben. Dadurch war die Spannkrafterhöhung im Zugseil verzögert und entsprechend in der Zeit verlängert. Aber als Folge einer solchen Betriebsart ergibt sich eine Verringerung der Förderleistung. Die Analyse der in diesem Zusammenhang durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen hat uns zur Schlussfolgerung geführt, dass die Wahrscheinlichkeit des Seilueberwurfes vom Durchhang des Zugseils abhängig ist, und zwar, je kleiner der Durchhang vor der Stuetzenueberfahrt ist, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit des Seilueberwurfes. Um den Durchhang des Zugseils zu reduzieren, haben wir einen für die damalige Zeit (das war ca. vor 30 Jahren!) kühnen Vorschlag gemacht – vor der Annäherung zur Stütze eine Erhöhung des Drehmomentes ca. um 15 bis 18 kNm für die Zeitspanne von 1,2 bis 2.5 s zu realisieren. Die praktische Prüfung dieses Steueralgorithmus hat die Richtigkeit der Empfehlung – den Durchhang des Zugseiles klein halten – vollkommen bestätigt. Bei der Einschätzung des beschriebenen Steueralgorithmus muss man auch festhalten, dass die Realisierung eine ziemlich feine Steuerung der Bahn erfordert, was bei gegenwärtigen Technologien kein Problem darstellt.

Das Problem des Seilueberwurfes wurde bei 3S-Bahnen und Pendelbahnen mit Doppeltragseilen durch die Aufhaengung von Stuetzrollen für das Zugseil auf die Tragseile geloest. Damit wurde der Durchhang des Zugseils wesentlich reduziert. Aber eine solche Loesung ist bei Zweiseilbahnen mit einem Tragseil nicht moeglich. Unter Beruecksichtigung der Tatsache, dass gegenwaertige Steuerungssysteme zuverlaessig und praezis sind, waere die Anwendung des beschriebenen Algorithmus zur Vermeidung von Zugseilueberwuerfen vorteilhaft.

Referenzliste:

- [1] David Pataraiia. The calculation of rope-rod structures of ropeways on the basis of the new approach. WORLD CONGRESS of O.I.T.A.F., RIO DE JANEIRO, BRAZIL, October, 2011, 24 – 27, PAPERS OF THE CONGRESS; <http://www.oitaf.org/Kongress%202011/Referate/Pataraiia.pdf>
- [2] <http://www.mining.org.ge/develop/pataraiia-dmr/index.html>
- [3] D. Pataraiia. Ein Beitrag zur diskreten Darstellung des Seiles. Wissenschaftliche Arbeiten des Instituts fuer Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen, Technische Univesitaet Wien, 1981.Se.34