

6/47

Elektricitestvo  
(1968) 8, S. 10/16

Verskov, V.A., Nachapatjan, K.T., Ol'sevskij, O.V., Sovalov, S.A.,  
Fotia, V.P. und Seerbakov, V.K.:

AUSFÜHRLICHE VERSUCHE AN EINER AUF HALBWELLENLÄNGE ABGESTIMM-  
TEN LEITUNG IM EUROPÄISCHEN 500-kV-VERBUNDNETZ DER SOWJETUNION

Infolge der naturbedingten und wirtschaftlichen Besonderheiten der Sowjetunion wird schon seit einer Reihe von Jahren das Problem der Errichtung von Fernleitungen (Übertragungsleitungen) von 2000 bis 4000 km Länge und einer Nennleistung von 5000 MW und mehr pro Stromkreis untersucht. Wie Untersuchungen des Sibirischen Forschungsinstituts für Energetik (SibNIE) und anderer sowjetischer wissenschaftlicher Institutionen zeigten, kann diese Aufgabe außer mit der Errichtung von Gleichstromübertragungen auch auf der Basis von dreiphasigen, auf eine Wellenlänge von etwas mehr als  $180^{\circ}$  abgestimmten Leitungen gelöst werden.

Der wesentliche Vorteil der abgestimmten Leitungen liegt in der Einfachheit ihrer Anordnungen (Schemata) und Ausrüstung. Weiter bleiben die Eigenarten des klar ausgeprägten Wellencharakters der abgestimmten Leitungen im Normalbetrieb und im Fehlerfall gewahrt. Diese Eigenschaften verleihen den Leitungen einen außergewöhnlichen Charakter und zwingen dazu, die Meinung über die Lösung von Stabilitätsproblemen, von Fragen des Schutzes vor inneren Überspannungen, des Relaisschutzes, der Systemregelung u.a. zu revidieren. Ungeachtet dessen, daß die Besonderheiten von Normalbetrieb und Fehlerfall sowohl durch theoretische Verfahren als auch durch Versuche an Modellen aufgezeigt worden sind, war zur Lösung der Fragen, die bei den Untersuchungen und Projektierungsarbeiten über abgestimmte Lei-

tungen auftauchten, die Durchführung von Versuchen am Original erforderlich. Daher wurde beschlossen, die Versuche an einer abgestimmten Leitung im europäischen 500-kV-Verbundnetz der Sowjetunion durchzuführen.

Eine Analyse der Möglichkeiten dieses Netzes ließ keine große Auswahl hinsichtlich einer Änderung der Abstimmungsmöglichkeiten der Leitungen, da die Versuche ohne Verminderung der Betriebssicherheit der zum Versuch herangezogenen Systeme und mit den geringsten Veränderungen in den Betriebszuständen durchgeführt werden mußten.

In der ausgewählten Variante des Versuchsschemas sollte Energie von den Sammel-Schienen des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII. Parteitag" (Wasserkraftwerk Wolgograd) über die östliche 500-kV-Leitung Wolgograd - Moskau, die nördliche 500-kV-Leitung Kujbyšev - Moskau und über die 500-kV-Leitung Kujbyšev - Ural in das System von Čeljabinsk übertragen werden (Zeichnung 1). Die Gesamtlänge der Leitung betrug 2 858 km. Die Wellenlänge dieser Leitungen beträgt zusammen  $173^{\circ}$ . Unter Berücksichtigung der Reaktanz der sendeseitigen Station (Transformatoren) und des Empfangssystems (Transformatoren, Empfangsnetz) kann man die Ersatz-Wellenlänge der Leitungen gleich  $187^{\circ}$  annehmen. Eine Voruntersuchung zeigte, daß bei dieser Wellenlänge der Leitung und großem Wirkwiderstand (Leitungswiderstand) die Gefahr einer Parameter-Instabilität (Selbstaufschaukeln) bei Übertragungsleistungen, die etwa die Hälfte der natürlichen Leistung übersteigen, besteht.

Die Kommission für die Durchführung der Versuche ließ sich bei der Aufstellung des Programms von folgenden Zielsetzungen leiten: Prüfung der Belastungscharakteristiken der abgestimmten Leitung, Prüfung der Bedingungen für das Auftreten von Selbstaufschaukeln und der Möglichkeit, die Schwingungen mit stark wirkenden Feldreglern (Erreger-Feldreglern) zu beseitigen, Präzisierung des Charakters von Einschwingvorgängen, die bei betriebsmäßigen Schalthandlungen und im Fehlerfall im Übertra-

gungssystem zu Überspannungen führen, Ermittlung der Parameter der abgestimmten Leitung und Bestimmung des Grades ihrer Asymmetrie.

Aufgrund der fehlenden Erfahrung hinsichtlich der Betriebsweise einer abgestimmten Leitung in arbeitenden Netzen sowie infolge der ungewöhnlichen Maßstäbe der am Original durchgeführten Untersuchungen, die sich über ein riesiges Gebiet erstrecken, war die Durchführung der Versuche mit einem gewissen technischen Risiko verbunden.

Um dieses Risiko auf ein Minimum zu reduzieren und die Effektivität der Versuche zu erhöhen, wurden Voruntersuchungen an Modellen durchgeführt. Die Untersuchungen am Modell des Elektrotechnischen W.I. Lenin-Instituts der UdSSR (VEI) ermöglichten es, ein Überspannungs-Schutzsystem für die Versuchszeit auszuwählen. Entsprechend dem Programm durchgeführte Untersuchungen von Normalbetriebszuständen und Fehlerfällen an einem Modell des SibNIE ermöglichten die Ausarbeitung von Empfehlungen für die Betriebsweise während der Versuche.

An den unter Leitung der Vereinigten Dispatcher-Verwaltung (Hauptlastverteiler) im europäischen Verbundnetz der UdSSR (ODU EES) durchgeführten Versuchen wirkten mit: die 500-kV-UEES Mosenergo<sup>1</sup>, das VEI, das SibNIE sowie das Unions-Forschungsinstitut für Energetik (VNIE), das Forschungsinstitut für Gleichstrom (NIPT), das Moskauer Institut für Energetik (MEI), das Leitungs- und Betriebspersonal der Ural-ODU, die ODU des mittleren Wolgagebiets, der Energiesysteme Wolgograd, Moskau, Kujbysev, <sup>V</sup>Celjabinsk u.a.; die Durchführung der Versuche unterstützten weiter die Mitglieder der Kommission, die das tech-

---

1 Mosenergo = Moskovskoe rajonnoe upravlenie energetičeskogo chozjajstva Glavcentroenergo Ministerstva elektrostancij SSSR (Moskauer Gebietsverwaltung für Energiewirtschaft der Zentralgebiete im Ministerium für Kraftwerke der UdSSR)

nische Programm ausarbeitete, Spezialisten des Leningrader Polytechnischen M.I. Kalinin-Instituts (LPI) u.a.

Die Betriebsleitung erfolgte von dem Dispatcherposten (Lastverteiler) ODU EES aus. Es wurde eine Direktverbindung des Dispatcherpostens ODU EES mit allen wichtigen, am Versuch beteiligten Stellen hergestellt. Eine besondere Automatik wurde durch das VEI eingesetzt, mit deren Hilfe vom Wolga-Wasserkraftwerk "XXII. Parteitag der KPdSU" Oszillographen in Gang gesetzt wurden und nach vorgegebenem Programm die notwendigen Schalthandlungen (Einschalten und Abschalten der Schalter) in allen Punkten vorgenommen wurden; Kanäle wurden gelegt zur Messung des Winkels zwischen einem an die Leitung angeschlossenen Generator und den 500-kV-Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "V.I. Lenin". Oben beschriebener Winkel wurde mittels einer Apparatur des NIIPT gemessen.

An der Versuchsleitung wurden alle Autotransformatoren, Nebenschlußreaktoren, ein Teil der Spannungswandler und Ableiter von den Schaltüberspannungen in der Leitung abgeschaltet. Zur Überspannungsbegrenzung wurden in einer Reihe von Punkten in den drei Phasen der Leitung Schutzfunkenstrecken eingerichtet. Von den Schaltern wurde der Betriebsstrom in einem Reihenschaltungskreis von Leitungsabschnitten abgenommen. Bei der Übertragung wurden verschiedene Relaischutz-Einrichtungen benutzt: Schutzeinrichtungen, die beim Auftreten von gegenläufiger Spannung (Spannung umgekehrter Folge) auf das Abschalten der Schalter an den Leitungsenden wirken sowie auf das Einschalten des Erdungsschalters in Arzamas; Schutzeinrichtungen, die auf Nullstrom reagieren, den Betrieb der Automatik des VEI verzögern und die Schalter nach dem Kurzschluß abschalten; Schutzeinrichtungen gegen eine Spannungserhöhung an den Leitungsenden und in Arzamas. Darüber hinaus wurde eine Reihe existierender Schutz-einrichtungen an den vorderen Abschnitten der Leitung benutzt. Es wurde ein Reservesystem zum Abschalten des Schalters (Reserveabschaltsystem) am Empfangsende der Leitung angebracht. Die Feldregler der Generatoren des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII.

Parteitag der KPdSU" wurden auf die Versuchsbedingungen abgestimmt.

Für das erste An-Spannung-Legen der Leitung in der Nähe ihrer elektrischen Mitte wurde in der Unterstation Arzamas eine dreipolige Erdung durch einen Schalter eingerichtet. Durch ein derartiges Schaltbild konnten die Mindestwerte der Augenblicksspannungen garantiert werden. Die in der Unterstation Arzamas geerdete Leitung wurde durch Einschalten des Leitungsschalters von den 500-kV-Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII. Parteitag der KPdSU" gespeist; im Wasserkraftwerk wurden für die 500-kV-Sammelschienen neun Generatoren bereitgestellt. Die Länge der Leitung vom Wasserkraftwerk bis Arzamas beträgt 1 572 km. Vor dem Einschalten wurde die Spannung im Wasserkraftwerk auf 430 kV gesenkt. Während des Einschwingens trat die größte Spannung an den Sammelschienen der Unterstation Lipeck auf und betrug 1,64 der maximalen Betriebsspannung  $\left( \frac{\sqrt{2} \cdot 525 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \right)$ . Das Oszillogramm des Versuchs ist in

Zeichnung 2 dargestellt. Wegen des Unterschieds zwischen der Wellenlänge des parallelgeschalteten Leitungsabschnittes und der Viertelwelle betrug die von der Übertragungsstrecke (der Leitung) an den Schienen des Wasserkraftwerks erzeugte Blindleistung im stationären Zustand ungefähr 100 MVar, die erforderliche Wirkleistung  $\sim 50$  MW, der Strom am Leitungsanfang  $\sim 150$  A. Der Strom durch den Erdungsschalter (den Schalter im Nebenschlußkreis) betrug 930 A. Dann wurde die in Arzamas parallelgeschaltete Übertragung an die Schienen des Empfangssystems bei einer Spannung von 490 kV angeschlossen. Die beim Einschwingen beobachteten Maximalspannungen sind dem Nennwert ähnlich, da die Länge des Leitungsabschnitts Sagol - Arzamas bedeutend geringer ist als die Viertelwellenleitung (1 286 km). Im stationären Zustand war die Spannung am Leitungsanfang ungefähr 480 kV, die von den Sammelschienen in Sagol her geforderte Blindleistung betrug  $\sim 100$  MVar, die Wirkleistung  $\sim 50$  MW, der Strom am Leitungsanfang  $\sim 130$  A, am Ende - 1 060 A.

Somit können durch die Wahl der Erdschlußstelle der Leitung die Größen der Augenblicksspannungen beim Einschaltvorgang reguliert werden.

Bedeutend größere Werte für die Augenblicksspannungen wurden bei einseitigem Einschalten der gesamten Halbwellenleitung gewonnen. In Zeichnung 3 sind die Einschalt-Oszillogramme der Leitung von seiten des Empfangssystems her aufgeführt. Die Spannung am offenen Ende der Leitung erreichte fast 800 kV. Dabei ergab sich ein Stoßkoeffizient von ungefähr 2,0. Die gleichen Augenblicksspannungen traten auch beim Anschluß der gesamten Halbwellenleitung an die Sammelschienen des Wasserkraftwerks auf. Das Abschalten der unbelasteten Leitung von der Spannungsquelle war leicht durchführbar. Die Leitung wird nach dem Abschalten mit einer der Betriebsfrequenz des Netzes ähnlichen Frequenz schwingen. Daher wächst die Spannung an den Kontakten des Schalters, mit welchem die Leitung abgeschaltet wird, langsam an, ohne über das Doppelte hinauszugehen.

Die zweistufige Einschaltung der Halbwellenleitung, bei der die Leitung mit Erdung im mittleren Teil an die Spannungsquelle angeschlossen und dann der Erdschluß (Nebenschluß) wieder aufgetrennt wird, erlaubte es nicht, die Größen der Augenblicksspannungen am offenen Leitungsende zu senken. In Zeichnung 4 ist das Spannungs-Oszillogramm des offenen Leitungsendes nach dem Ausschalten des Erdungsschalters der Unterstation Arzamas bei Speisung der Leitung von den Sammelschienen der Unterstation Sagol her dargestellt. Die Augenblickswerte der Spannungen erreichen die gleichen Größen wie auch im Falle eines unmittelbaren Anschlusses der unbelasteten Leitung an die Sammelschienen der Unterstation Sagol.

Es wurde eine erfolgreiche Synchronisierung des Stroms der Leitung, die an den Erdungsschalter der Unterstation Arzamas angeschlossen war, sowohl seitens des Wasserkraftwerks als auch seitens des Empfangssystems, durchgeführt. Die Leitung wurde durch Öffnen des Erdungsschalters in Betrieb gesetzt. Die Instabilität der Frequenz der Generatoren infolge deren geringen

Belastung erlaubte es nicht, eine genaue Synchronisierung mit dem Abschalten des Erdschlußkreises (Erdungskreises) beim Minimalwert des Stroms im Schalter durchzuführen. Das Abschalten des Schalters erfolgte bei dem Frequenzunterschied 0,175 Hz und bei einem Strom im Nebenschlußkreis von 630 A, was einem Winkel zwischen den Spannungsvektoren an den Leitungsenden von  $145^{\circ}$  anstatt der  $180^{\circ}$  bei genauer Synchronisierung entsprach. Es entstanden merkliche, jedoch rasch gedämpfte Schwingungen. Der Wirkleistungsanfall im Wasserkraftwerk erreichte 900 - 950 MW, die Leistungsanstiegszeit - 0,06 sec. Die Schwingungsdauer betrug 0,9 sec, die Schwingungen schwächten sich innerhalb von 5 - 7 sec ab. Die Spannungen in der Unterstation Arzamas erreichten während des Einschwingens den Maximalwert der Größenordnung 1,4 praktisch gleichzeitig mit dem ersten Maximum der Blindleistung. Der Verlauf der Synchronisierung in dieser Unterstation ist in Zeichnung 5 dargestellt.

Ein Synchronisierungsversuch nach dem üblichen Verfahren (Synchronisierung der Spannung) wurde an den Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII. Parteitag der KPdSU" angestellt. Eine Leitung mit der Länge 2 858 km wurde von den Sammelschienen der Unterstation Sagol unter Spannung gesetzt. Die Synchronisierung war nicht genau, und die Generatoren des Wasserkraftwerks wurden an den Parallelbetrieb vom OES Ural bei einem Winkelunterschied der Spannungsvektoren von  $\sim 30^{\circ}$  angeschlossen. Die Wirkleistung durchlief am Leitungsanfang bei den Schwingungen hintereinander die Scheitelwerte + 850 MW, - 510 MW, + 347 MW. Die Schwingungsdauer war 0,80 sec. Etwas später - im Laufe der Versuche - wurde eine entsprechende Synchronisierung mit größerer Genauigkeit durchgeführt; sie war von weniger Schwingungen begleitet.

Ohne Belastung arbeitete die Übertragung stabil. Die Wahl der Wirkleistung erfolgte in kleinen Stufen zu 100 MW. Bei den ersten Stufen der Erhöhung der Übertragungsleistung wurde nicht immer die nach dem technischen Versuchsprogramm gewählte Bedingung - die Blindleistung am Empfangsende der Leitung

auf kleine Werte zu beschränken<sup>1)</sup> <sup>veingehalten</sup> später wurde dann diese Forderung durch gleichzeitige entsprechend abgestimmte Regelung der Wirkleistung und der Spannung am Leitungsanfang erfüllt, d.h. durch Vergrößerung des Spannungsschritts bei einer Steigerung der Übertragungsleistung.

Die ersten Merkmale für ein Selbstaufschaukeln zeigten sich bei einer Vergrößerung der Wirkleistung bis auf 400 MW am Leitungsanfang; die Generatoren des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII. Parteitag der KPdSU" arbeiteten dabei mit Proportional-Feldreglern. Bei 500 MW setzte ein intensives Selbstaufschaukeln ein.

Zur Verbesserung der Stabilität bei der Übertragung von Leistung über 400 - 500 MW wurde eine spezielle Feldregelung eingeführt. Danach wurde - bis zu einer Übertragungsleistung von 975 MW - das Selbstaufschaukeln beseitigt. Zur Beseitigung des Aufschaukelns bei größeren Belastungen wurde die Übertragungsleistung auf 920 MW gesenkt und bei der Unterstation <sup>V</sup> Sagol die 500-kV-Leitung <sup>V</sup> Sagol - Troickaja GRES <sup>1</sup> abgeschaltet, wodurch der Ersatz-Blindwiderstand des Empfangssystems vergrößert wurde. Die Schwingungen wurden beseitigt und die Vergrößerung der Übertragungsleistung fortgesetzt. Bei voller Auslastung der neun Generatoren und der Gesamtleistung von 1 043 MW, d.h. bei Übertragung einer Leistung, die der natürlichen Leistung (1 000 MW bei einer Spannung von 525 kV) nahekommt, war der Betriebszustand stabil. Ungeachtet der ungünstigen Bedingungen (die Länge der Leitung ist kleiner als eine Halbwelle, relativ großer Wirkwiderstand) wurde somit ein hoher Grad der statischen Stabilität der Übertragung gewährleistet.

Bei der Übertragung einer Leistung von 1 000 MW wurde die

---

1 GRES = gosudarstvennaja rajonnaja (teplovaja) elektrostancija <Staatliches Bezirks-Wärmeleistungswerk>



Spannung am Sendeende auf 525 kV angehoben, die Spannung am Empfangsende wurde auf 470 kV gehalten, die Spannung in Arzamas erhöhte sich auf 482 kV; die Wirkverluste betragen 225 MW, einen Teil davon machten Koronaverluste aus. Die Daten für einige aufgezeichnete Betriebszustände und ihre Gegenüberstellung mit den berechneten Werten, die ohne Berücksichtigung der Koronaverluste gewonnen wurden, sind in der folgenden Tabelle und in Zeichnung 6 aufgeführt.

Die graphische Darstellung der Betriebszustände zeigte die Ähnlichkeit der Versuchswerte mit den berechneten Werten; die Gründe für einige vorhandene Abweichungen bedürfen einer zusätzlichen Erklärung. Einige Geräte (insbesondere Geräte vom Sendeende der Leitung) wiesen - infolge der Überlastung der Wandler und ihrer Nebenschleife - eine erhöhte Fehlerhaftigkeit auf. Die Differenzen wurden auch durch die Vernachlässigung der Koronaverluste in den Berechnungen verursacht.

Der hohe Grad statischer Stabilität der auf eine aperiodische Grenze abgestimmten Leitung trägt zur Beibehaltung ihrer Stabilität bei dynamischen Vorgängen (Übergängen) bei. Da sie relativ große Reserven an dynamischer Stabilität besitzt, ist die abgestimmte Leitung jedoch empfindlich gegenüber Schwingungen der gekoppelten Systeme infolge einer physikalischen Besonderheit: die Spannung in den mittleren Leitungsabschnitten ist der Belastung am Leitungsende proportional. Je größer der Schwingungswinkel ist, desto stärker ist der Spannungsanstieg in der Leitungsmitte. Bei den Grenzwinkeln kann ein Überschlag der Schutzfunkenstrecken stattfinden, wodurch die Leitung abgeschaltet und aus dem Betrieb genommen wird. Zur Prüfung der dynamischen Kenndaten der abgestimmten Leitung wurden Versuche über die Erregung von Schwingungen durchgeführt, die durch einphasige Kurzschlüsse in Arzamas und Kujbyšev hervorgerufen wurden.

Nach einem Anstieg der Wirkleistung am Leitungsanfang auf 635 MW (510 MW am Empfangsende) wurde der Versuch mit einem einphasigen Kurzschluß in Arzamas (Zeichnung 7) durchgeführt.

Die Oszillogramme des Versuchs zeigten, daß der Kurzschluß 0,14 sec dauerte und zu einem Leistungsabfall von ungefähr 200 MW im Wasserkraftwerk führte. Nach Abschalten des Kurzschlusses konnten Schwingungen beobachtet werden: die erste Amplitude der Wirkleistung am Leitungsanfang - 990 MW, dann folgten eine Leistungsabsenkung auf 410 MW und ein zweites Maximum der Leistung - 825 MW. Die Schwingungsdauer betrug ungefähr 0,8 sec. Nach 5 sec hörten die Schwingungen praktisch auf. Der größte Überspannungsfaktor im Fehlerfall wurde in der Unterstation Lipeck registriert: 1,6. Bei den Schwingungen lag die bezogene Maximalspannung ungefähr bei 1,3. Der Unterschied zwischen den Maximal- und Mindestwerten des Winkels zwischen der EMK (elektromotorischen Kraft) des Generators des Wasserkraftwerks und den 500-kV-Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "V.I. Lenin" betrug bei den Schwingungen  $28^{\circ}$ .

Weiter wurde noch ein Versuch mit einer Belastung (Ausgangsleistung) von 580 MW und einer Vergrößerung der Kurzschlußdauer auf  $\sim 0,75$  sec durchgeführt.

Bei der großen Stabilitätsreserve sind die Einschwingvorgänge im zweiten Versuch den Vorgängen im ersten Versuch ähnlich.

Bei [vorausgegangener] Übertragung einer Leistung von 635 MW waren die Versuche mit einphasigem Kurzschluß an den Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "V.I. Lenin" mit einer Dauer von 0,25 bzw. 0,27 sec von einem Leistungsabfall von ungefähr 200 MW begleitet.

Der größte Überspannungsfaktor während des Einschwingens wurde in der Unterstation Lipeck beobachtet - 1,95. Dort betrug der Überspannungsfaktor vor dem Abschalten des Kurzschlusses 1,8 - 1,9.

Beim Abschalten des Kurzschlusses traten Schwingungen auf mit den nachstehenden aufeinanderfolgenden Amplituden der Wirkleistung am Leitungsanfang: erstes Maximum - 850 MW, Minimum - 440 MW, zweites Maximum - 780 MW. Der Unterschied zwischen

den Maximal- und Mindestwerten des Winkels zwischen der EMK des Generators des sendeseitigen Wasserkraftwerks und den 500-kV-Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "V.I. Lenin" bei den Schwingungen betrug  $28^{\circ}$ .

Um den Einfluß der Nullsystemparameter einer Halbwellenleitung auf die Augenblicksspannungen zu klären, wurden drei Versuche mit einphasigen Kurzschlüssen durchgeführt: an den 500-kV-Sammelschienen der Unterstation Lipeck, des Wolga-Wasserkraftwerks "V.I. Lenin" und der Unterstation  $\overset{V}{\text{Sagol}}$ , wobei die Leitung einseitig an die Sammelschienen des Wolga-Wasserkraftwerks "XXII. Parteitag der KPdSU" angeschlossen war.

Die Dauer der einphasigen Kurzschlüsse war: beim Kurzschluß in Lipeck - 0,19 sec, im Wolga-Wasserkraftwerk "V.I. Lenin" - 0,26 sec und in  $\overset{V}{\text{Sagol}}$  - 0,13 sec.

Eine Analyse der Oszillogramme zeigte, daß der größte aufgezeichnete Überspannungsfaktor während des Einschwingens jeweils betrug: beim Kurzschluß in Lipeck - 1,82 (in  $\overset{V}{\text{Sagol}}$ ), im Wolga-Wasserkraftwerk "V.I. Lenin" - 1,75 (in Lipeck), in  $\overset{V}{\text{Sagol}}$  - 1,95 (in  $\overset{V}{\text{Sagol}}$ ).

Eine Vorstellung vom Charakter der Einschwingvorgänge kann man an dem Oszillogramm in Zeichnung 8 erhalten. Die Spannungen während des Einschwingens an den Sammelschienen der einspeisenden Station erreichten Werte der Größenordnung 1,20, wobei die bezogenen stationären Spannungen im Fehlerfall von der Größenordnung 1,1 waren.

Zur Klärung des Zusammenhangs zwischen den elektromechanischen und elektromagnetischen Vorgängen in einer abgestimmten Leitung wurden Versuche einer Grobsynchronisierung des Stroms durchgeführt, wobei die Augenblicksspannungen auf Werte eingestellt wurden, die das Ansprechen der Sicherheitsfunkenstrecken hervorrufen.

Während des Versuchs einer Grobsynchronisierung beim Betrieb von sechs Generatoren im Wasserkraftwerk erfolgte (während der Abnahme des Stroms) das Abschalten des Erdungsschalters in Ar-

zamas bei einem Strom von 920 A in der Erdleitung und einer Frequenzdifferenz von 0,1 Hz. Ein erster Leistungssprung erfolgte in Richtung des Wasserkraftwerks und betrug am Sendende der Leitung 1 025 MW (aufeinanderfolgende Amplituden: -1 025, + 950, -640 MW). Die Synchronisierung erwies sich somit als erfolgreich, war aber von sehr großen Schwingungen und Überspannungen begleitet. Der Überspannungsfaktor war im Wolga-Wasserkraftwerk "V.I. Lenin" fast 1,9.

Im letzten Versuch einer noch stärkeren Grobsynchronisierung erfolgte (bei einer Stromzunahme) das Abschalten des Erdungsschalters bei einer Frequenzdifferenz von 0,6 Hz und einem Strom in der Erdleitung von 1 020 A.

Dabei sprachen die Sicherheitsfunkenstrecken im Verlauf des Aufbaus der Schwingungen an, und die Übertragung wurde abgeschaltet. Die größten, in den Oszillogrammen aufgezeichneten Überspannungen haben folgende Faktoren: Phase A im Wolga-Wasserkraftwerk "V.I. Lenin" 2,3; in Lipeck - Phase C - 2,14; Phase B in Arzamas 2,27.

Hiermit wurden die Versuche beendet. Ihre Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

1. Das geplante Versuchsprogramm einer abgestimmten Leitung Wolgograd - Moskau - Kujbysev - Ural ist erfolgreich und vollständig durchgeführt worden. Über eine ungefähr 3 000 km lange Leitung wurde bei einem Mindestgrad an Abstimmung eine Leistung (im gesamten Änderungsbereich der Belastung) bis zu 1 Million kW stabil übertragen. Mit diesem Übertragungsprinzip bestand die Möglichkeit einer weiteren Erhöhung der zu übertragenden Leistung. Die abgestimmte Leitung ließ sich gut regeln; es wurden keinerlei Schwierigkeiten beim Betrieb der 500-kV-Serienausrüstung beobachtet.

2. Die Versuche bestätigten die theoretischen Folgerungen, daß abgestimmte Leitungen funktionsfähig sind und als Mittel der Energieübertragung über besonders weite Entfernungen dienen können unter der Bedingung, daß einige Fragen ihrer Be-

triebssicherheit gelöst werden.

3. Die Ergebnisse der Versuche am Original haben große Bedeutung für die Weiterentwicklung der Theorie abgestimmter Fernleitungen; es wurde die Erscheinung von Parameterinstabilität der Generatoren (Selbstaufschaukeln) untersucht und Mittel zu deren Beseitigung wurden erarbeitet; es wurden Versuche mit Einschwingvorgängen der Energieübertragung durchgeführt, die es ermöglichten, den Einfluß linearer und nichtlinearer Parameter der Fernleitung auf die Entwicklung der elektromagnetischen und elektromechanischen Vorgänge zu bestimmen und die Verfahren zur elektrodynamischen Nachbildung von abgestimmten Leitungen zu vervollkommen.

4. Die Einschalt- und Synchronisierungsverfahren einer abgestimmten Leitung wurden einer Prüfung unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, daß diese Betriebsarten ohne besondere Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung und Einschränkung der inneren Überspannungen erfolgreich ablaufen; die Spannungssynchronisierung ist in einer geerdeten (parallelgeschalteten) Leitung ruhiger als die Synchronisierung des Stroms, jedoch mit etwas größeren Augenblicksspannungen beim Einschalten der Leitung verbunden.

5. Es wurde die Eigenart der Regelung im Normalbetrieb bei einer abgestimmten Leitung überprüft und die Möglichkeit zur Sicherung eines stabilen Betriebs und der Beseitigung des Selbstaufschaukelns bei nichtausreichenden Abstimmungswinkeln mit Hilfe von stark wirkenden Feldreglern bestätigt. Weiter ist die Durchführung von zusätzlichen Untersuchungen zur Ermittlung eines optimalen Regelgesetzes für Generatoren erforderlich, die mit einer abgestimmten Leitung zusammenarbeiten.

6. Die untersuchte Serie von Fehlerfällen an einer belasteten Leitung zeigte deren relativ hohe Stabilität bei dynamischen Übergangsvorgängen auf. Die in diesen Fehlerfällen sowie im einphasigen Kurzschluß bei einseitiger Speisung der Leitung auftretenden inneren Überspannungen gingen über das berechnete Isolationsniveau der 500-kV-Leitung nicht hinaus.

Beim Abschalten der leerlaufenden Leitung gingen die Spannungsamplituden während des Einschwingens nicht über die Amplitude der stationären Spannung im vorausgehenden Zustand hinaus. Innerhalb von 10 - 12 Perioden der Betriebsfrequenz nach dem Abschalten klingen die Schwingungen in der Leitung praktisch vollständig ab. Die Arbeitsbedingungen für die Schalter sind sehr einfach. Die durchgeführten Versuche mit einphasigem Kurzschluß liefern keine vollständigen Angaben über den Gefährlichkeitsgrad der inneren Überspannungen im Falle einer Beschädigung der abgestimmten Leitung. Daher bedürfen die Fragen nach den möglichen Größen der Überspannungen bei Kurzschlüssen in einer Leitung und in den Systemen in der Nähe der Leitungsenden und nach den an die Schutzvorrichtungen zu richtenden Anforderungen einer zusätzlichen Prüfung.

7. Durch die Ausnutzung der vorhandenen Relaisschutz- und automatischen <Hilfs-> Systeme und mit einer Reihe zusätzlicher Maßnahmen ist es gelungen, das Abschalten einer Leitung im Fehlerfall zu gewährleisten. Gleichzeitig müssen - unter Berücksichtigung der Eigenart der Betriebszustände von abgestimmten Leitungen - spezielle Relais- und Fehlerschutz-Schaltungen entwickelt werden.

Abschließend sprechen die Autoren allen an den beschriebenen Versuchen beteiligten Stellen ihren Dank aus.

[5.5.1968]

Erläuterungen der Zeichnungen

- Zeichnung 1                    Schaltbild der 500-kV-Leitungen für die Untersuchungen an der Halbwellenleitung
- Zeichnung 2                    Das Einschalten der in Arzamas geerdeten Viertelwellenleitung
- Zeichnung 3                    Einschalten der offenen Halbwellenleitung auf der Seite des Energiesystems [<sup>V</sup>Sagol]
- Zeichnung 4                    Öffnen des Erdungsschalters der Halbwellenleitung in Arzamas
- Zeichnung 5                    Synchronisierung des Stroms in der Unterstation Arzamas  
 $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}$  - Ströme vom Wasserkraftwerk  
 $I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}$  - Ströme von <sup>V</sup>Sagol  
 $I_3$                     - Strom im Nebenschlußkreis
- Zeichnung 6                    Spannungsverteilung (a) und Stromverteilung (b) entlang der Leitung bei Übertragung verschiedener Leistung entsprechend der Tabelle  
————— = Versuchswerte; ----- Berechnung
- Zeichnung 7                    Einschwingvorgang in der Unterstation Arzamas bei einphasigem Kurzschluß (Bezeichnungen s. Zeichnung 5)
- Zeichnung 8                    Augenblicksspannungen am Leitungsende (<sup>V</sup>Sagol) bei einphasigem Kurzschluß an den Schienen der Unterstation Lipeck

Tabelle Seite 14

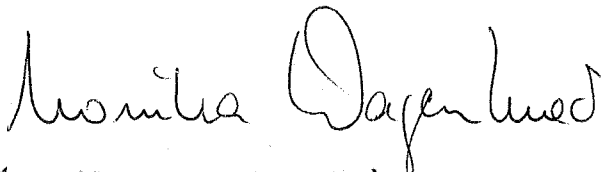
A n m e r k u n g : \* - erste Zeile - Versuch;  
\*\* - zweite Zeile - Berechnung

Anmerkung des Übersetzers

Bei den Termini in < > handelt es sich um die wörtliche Übersetzung.

Stuttgart, den 14.5.1969

i.A.



(Monika Wagenknecht)  
Dipl.-Übersetzerin



42

## COMPLEX TESTING OF A HALF-WAVE TUNED TRANSMISSION IN THE 500 kV INTERCONNECTION OF THE POWER GRID OF EUROPEAN U.S.S.R.\*

V. A. VERSHKOV, K. T. NAKHAPETYAN, O. V. OL'SHEVSKII,  
S. A. SOVALOV, V. P. FOTIN and V. K. SHCHERBAKOV

(Received 5 May 1968)

OWING to natural and economic factors, work has for many years been underway in the U.S.S.R. on the development of transmissions 2000-4000 km in length with a load carrying capacity of 5000 MW or more per circuit. As shown by studies at the Siberian Energetics Research Institute (SibNIIE) and in other Soviet scientific organizations, this problem can be solved not only by d.c. transmission, but also on the basis of three phase transmissions which are tuned to a wavelength slightly greater than  $180^\circ$ .

The main merit of tuned transmissions is their simplicity in regard to the equipment and scheme, but the pronounced wave nature of tuned lines introduces its own special features into normal and fault conditions, imparts to them a certain unconventionality and necessitates a revision of the problems of stability, protection from switching surges, relay protection, application of automatic control techniques and so on. Although the special features of normal and fault conditions have been elucidated by theoretical methods and experiments on models, the problems arising in research and development have required tests in actual conditions. It was therefore decided to perform such tests in the 500 kV interconnection of the Single Power System for the European part of the U.S.S.R.

An analysis of the possibilities of this network left little freedom of choice regarding the scheme of the tuned transmission since it was necessary to carry through the tests without reducing the reliability of the constituent power systems involved in the experiments and with

---

\* *Elektrichestvo*, No. 8, 10 - 16, 1968.

the least possible effect on operative switching schemes.

In the adopted test scheme power was transmitted into the Chelyabinsk power system from the bus-bars of the Volgograd HES (properly called the Volga XXII Congress Hydro-electric Station) along the eastern circuit of the 500 kV Volgograd-Moscow transmission, along the northern circuit of the 500 kV Kuibyshev-Moscow transmission and along the 500 kV Kuibyshev-Urals transmission (Fig. 1). The total length of the line was 2858 km,

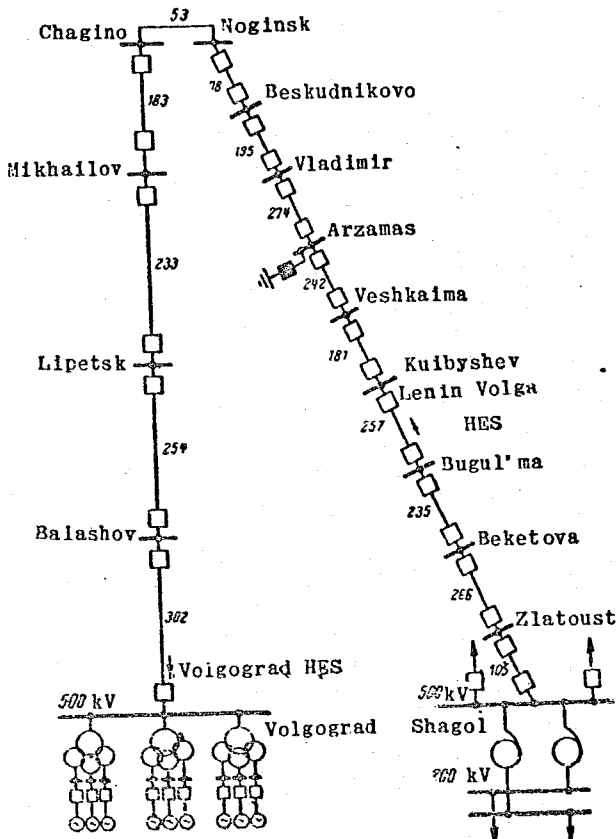


FIG. 1. Schematic representation of the 500 kV interconnection on test.

and its wave length was  $173^\circ$ , but considering the reactances of the sending station (transformer) and of the receiving system (transformer,

receiving system), the equivalent wavelength of the transmission can be taken to be  $187^\circ$ . Preliminary analysis showed that with this wavelength and a large resistance, there is a danger of parametric instability (self-oscillation, hunting) when transmitting powers greater than approximately half the natural power.

The Commission for performing the tests was guided by the following aims in drafting the programme: verification of the load characteristics of tuned transmissions, verification of the conditions under which hunting occurs and of the scope for eliminating fluctuations by means of high-response voltage regulators, closer refinement of the transients leading to surges in switchings and fault conditions, and determination of the parameters of the tuned transmission and of the degree of asymmetry of these parameters.

In view of the lack of experience in controlling a tuned transmission in an actual network, as well as the exceptional scale of the tests covering an enormous territory, a certain technical risk was involved. To reduce the risk to a minimum and to increase the effectiveness of the tests, preliminary studies were made on models. Studies on the model at the Lenin All-Union Electrotechnical Institute (VEI) enabled a system of surge protection to be selected, whilst other studies on a model at the Siberian Energetics Research Institute provided recommendations as to modes of operation in the testing.

The tests were carried out under CDC SPG (Combined Despatcher Control of the Single power grid for the European Part of the U.S.S.R.) with the following authorities taking part:

Moscow power system UEES-500 kV; Lenin All-Union Electrotechnical Institute (VEI); Siberian Energetics Research Institute (Sib.NIIE); All-Union Energetics Research Institute (VNIIE); D.C. Research Institute (NIIPT); Moscow Power Institute (MEI); management and service personnel of the Combined Despatcher Controls of the Urals, Middle Volga, Volgograd, Moscow, Kuibyshev, Chelyabinsk and other power systems.

Assistance was also forthcoming from members of the Commission for developing the technical programme, specialists at the Kalinin Polytechnical Institute in Leningrad (LPI) and from others.

Control was effected from the CDC SPG despatcher point. A direct link was organized between this despatcher point and all the other main testing points. At VEI special control apparatus was created so that from Volgograd Hydro-electric Station, it was possible to trigger the

oscillographs and initiate the switchings according to a prescribed programme (connexion and disconnexion of circuit breakers) at all other points. Also communication channels were organized for measuring the angle between one of the connected generators and the bus-bars of the Lenin Volga Hydro-electric Station, using apparatus of the D.C. Research Institute.

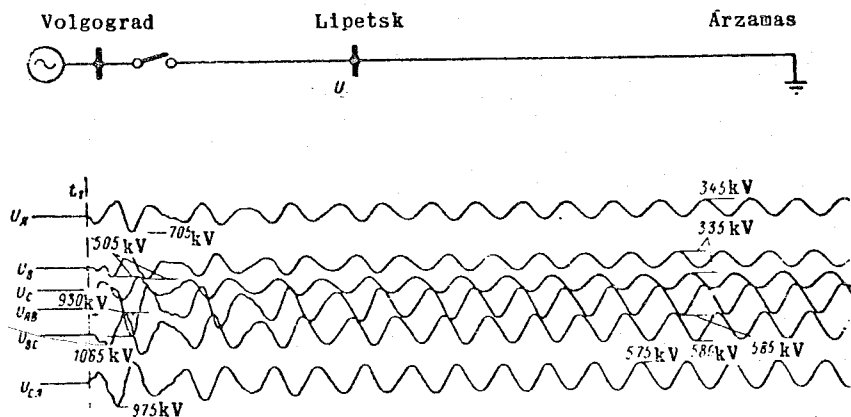


FIG. 2. Switching in the quarter-wave line earthed at Arzamas substation.

On the test transmission all the autotransformers, shunting reactors were disconnected, and so were some of the voltage transformers and the line switching surge arresters. In order to limit the surges, in some places protective sparkgaps were set on the three phases of the line. Operative current was removed from the circuit breakers in the circuit for series connection of line sections. Use was made of the installed relay protection, namely, protection acting to disconnect the breakers at the sending and receiving ends of the line when a negative sequence voltage appeared, and to connect the earthing breaker at Arzamas (Fig. 1); protection responding to negative sequence current and backing up the action of VEI control apparatus which disconnects breakers after short circuit closure; protection from voltage rise at the ends of the transmission and at Arzamas. Also a number of existing systems of protection were used on the 'head' (chief) sections of the transmission. A system was devised for backing up the disconnection of the breaker at the receiving end of the line. The voltage regulators of the generators at Volgograd HES were adjusted to test conditions.

For the first occasion when the line was switched in, three-pole

earthing through a breaker was set up near the electrical centre of the line at Arzamas substation. This arrangement was able to ensure minimum transient voltages. By closure of the line breaker the transmission earthed at Arzamas was supplied from the 500 kV bus at Volgograd HES; at the HES there were nine separate generators on the 500 kV bus. The length of line from the HES to Arzamas was 1572 km. Before closure the voltage at the HES was reduced to 430 kV. In transient conditions the maximum voltage occurred on the Lipenk substation bus and was equal to 1.64 times

the maximum operating voltage  $\left( \frac{\sqrt{2} \cdot 525 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \right)$ . An oscillogram of the

test is given in Fig. 2. Owing to the difference of the wavelength of the shunted part of the line from a quarter of a wave, the reactive power generated by the line on the HES bus was about 100 MVAR in the steady state, the consumed active power was approximately 50 MW, and the current at the sending end of the line was about 150 A. The current through the circuit breaker in the shunting circuit was 930 A. Then, afterwards, the transmission, shunted at Arzamas, was connected to the receiving system bus at 490 kV. In the transient conditions the observed maximum voltages were close to the rated value since the length of the Shagol-Arzamas section of the line was much less than a quarter wave (1286 km). In the steady state the voltage at the sending end of the line was about 430 kV, the reactive power consumed from the bus at Shagol was approximately 100 MVAR, the active power was about 50 MW, and the current was about 130 A at the sending end and about 1060 A at the receiving end.

Thus, by selecting the place where the line is earthed, it is possible to regulate the magnitude of the transient voltages in the process of connection.

The transient voltages were much greater, however, for unilateral closure of the half-wave line as a whole. Figure 3 shows oscillograms of line closure from the receiving system. The voltage at the open end of the line reaches almost 800 kV with a shock factor of about 2.0. Similar transient voltages also occurred on connecting the whole half-wave line to the HES bus-bars. A disconnection of a non-loaded line from the supply source appears to present no difficulties. After disconnection the line oscillates at a frequency which is close to the operating frequency of the network. The voltage on the contacts of the breaker which is disconnecting the line, therefore builds up slowly and does not exceed twice its value.

Two-stage closure where a line, earthed at its mid-point, is connected to its supply source and then, afterwards, the shunt is opened, permitted no reduction of the transient voltages at the open end of the

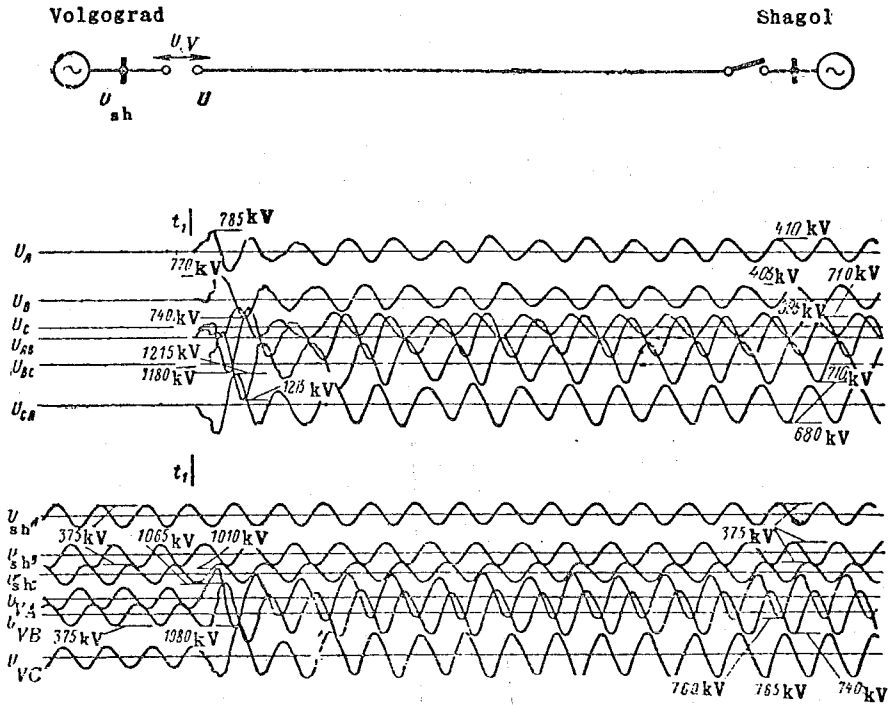


FIG. 3. Switching in the half-wave opened line from the power system.

line. Figure 4 shows an oscillogram of the voltage at the open end of the line after tripping the earthing breaker at Arzamas with the line supplied from the Shagol substation bus. The transient voltages reach the same values as in the case where a non-loaded line is directly connected to the Shagol substation bus-bars.

Success was achieved in current synchronization of a line connected to the earthing breaker of Arzamas substation on the receiving-system as well as the HES side. The line was switched into operation by tripping the earthing breaker. The instability of the frequency of the generators, due to their low load, did not permit precise synchronization with disconnection of the earthing circuit at minimum current in the breaker. The breaker was in fact tripped at a frequency difference of 0.175 c/s and with a current at 630 A in the shunting circuit, which corresponded to an angle of divergence between the voltage vectors in respect of the ends of the transmission which was of the order 145°.

instead of the  $180^\circ$  angle necessary for precise synchronization. Notable but quickly decaying fluctuations arose. The sudden increase of active power at the hydro-electric station reached 900 - 950 MW, the power build-up time was 0.06 sec. The fluctuation period was 0.9 sec, and the fluctuations decayed in 5 - 7 sec. The voltages at Arzamas substation in the transient process reached their maximum value of the order 1.4 practically simultaneously with the first maximum of reactive power. The course of synchronization at this substation is shown in Fig. 5.

The synchronization tests by the conventional (voltage) method were carried out on the bus-bars of the Volgograd HES. The line, 2858 km in length, was placed under voltage from the bus-bars of Shagol substation. Synchronization was not precise and the hydro-electric HES generators were connected in parallel operation with the Urals power grid (SPG) with an approximately  $30^\circ$  angle of divergence between the voltage vectors. The active power at the sending end of the line during the fluctuations

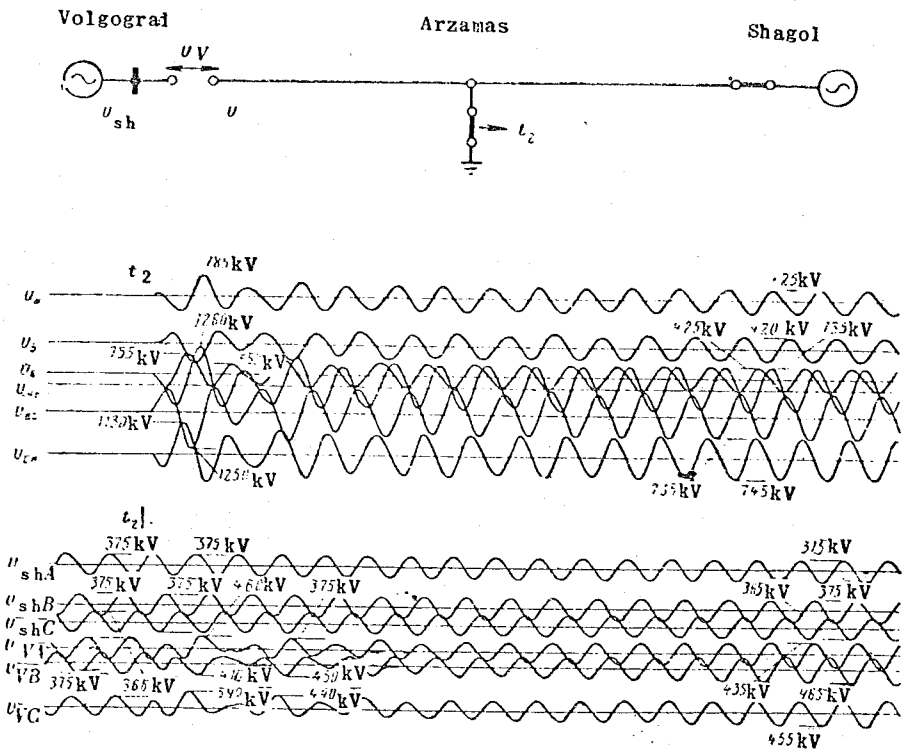


FIG. 4. De-earthing of the half-wave line at Arzamas.

successively passed through amplitudinal values of +850 MW, -510 MW and +347 MW. The fluctuation period was 0.80 sec. Slightly later in the testing, analogous synchronization was accomplished more finely and with less accompanying fluctuation.

Without load the transmission operated stably. The head of active power was effected in small stages of the order 100 MW. In the first

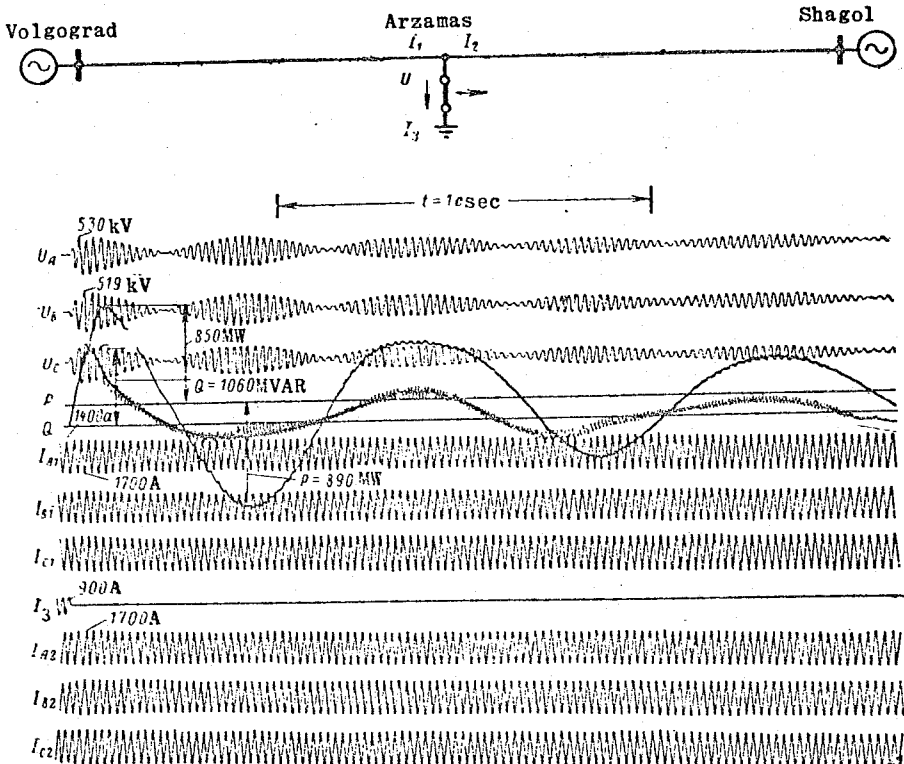


FIG. 5. Current synchronization at Arzamas substation:  
 $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  - currents on side of HES;  $I_{A2}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{C2}$  - currents on Shagol side;  $I_3$  - current in the shunting circuit.

stages of increase of the transmitted power, the technical test programme was not always observed, i.e. the reactive power at the receiving end was not limited to low values. Later this requirement was met by combined matched regulation of the active power and of the voltage at the sending end, i.e. by an increase of the voltage drop in the rise of the transmitted power.



The first signs of self-oscillation (hunting) appeared when the active power at the sending end was increased to 400 MW; in this case the generators at Volgograd HES were operating with proportional-type voltage regulators. At 500 kV intense self-oscillation commenced.

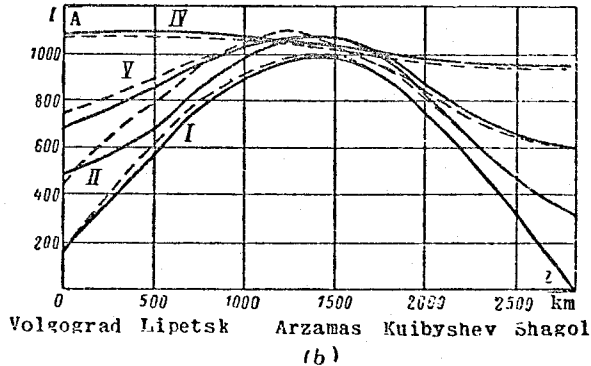
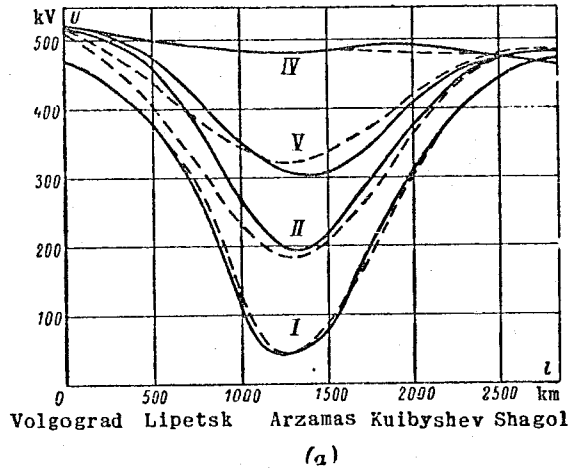


FIG. 6. Distribution of the voltage (a) and current (b) along the line on transmitting the outputs in the Table;

————— test data; - - - - - calculated.

To increase the stability level in transmitting more than 400 - 500 MW, special regulation of excitation was introduced, whereupon self-oscillation was eliminated up to 975 MW. To eliminate self-oscillation with large loads, the transmitted power was reduced to 920 MW and at the Shagol substation the 500 kV Shagol-Troitskaya HRES line was disconnected.

thereby increasing the equivalent reactance of the receiving system. The fluctuations were eliminated and the increase of transmitted power was continued. On full loading of the 9 generators with a total output of 1043 MW, i.e. on transmitting a power close to the natural power (1000 MW at 525 kV), the conditions were stable. Thus, despite the unfavourable conditions (line length less than a half-wave, relatively large resistance), a high level of static (steady state) stability was ensured on the transmission.

In transmitting power of the order 1000 MW, the voltage at the sending end was raised to 525 kV, the voltage at the receiving end was held at 470 kV, and the voltage at Arzamas substation was up to 482 kV; the losses of active power amounted to 225 MW, some being due to corona. The following Table and Fig. 6 show the data in respect of several recorded duties and a comparison is made with calculations in which losses due to corona are neglected.

TABLE 1.

No. n/n.	Sending end of line(HES)				Receiving end of line(Shagol)			
	P. MW	Q. MVAR	U, kV	I, a	P. MW	Q. MVAR	U, kV	I, a
I	107*	+67	478	151	0	0	475	0
	100**	+100	474	175	0	0	475	0
II	430	+10	520	490	260	+30	494	350
	385	+120	510	450	260	+30	494	350
III	600	+10	510	680	430	+30	476	570
	570	+98	504	662	430	+30	476	570
IV	935	-30	525	1070	760	-10	470	940
	964	-23	525	1063	760	-10	470	940
V	635	0	527	695	506	+40	488	600
	664	+100	520	748	506	+40	488	600

\* First line refers to tests;

\*\* Second line calculations.

The recordings showed that the test data and the calculations were closely in agreement; the reasons for the various deviations still await clarification. Some instruments (especially at the sending end) had large errors due to overloading of the measuring transformers and of their secondary circuits. Other deviations are due to neglecting corona losses in the calculations.

The high level of static stability of a tuned transmission in regard to the aperiodic limit, is instrumental in maintaining stability in dynamic transitions. Having a relatively large margin of dynamic stability, a tuned transmission is also sensitive to the fluctuations of associated systems, owing to the physical feature, which consists in the proportional relationship which exists between the voltage on the middle

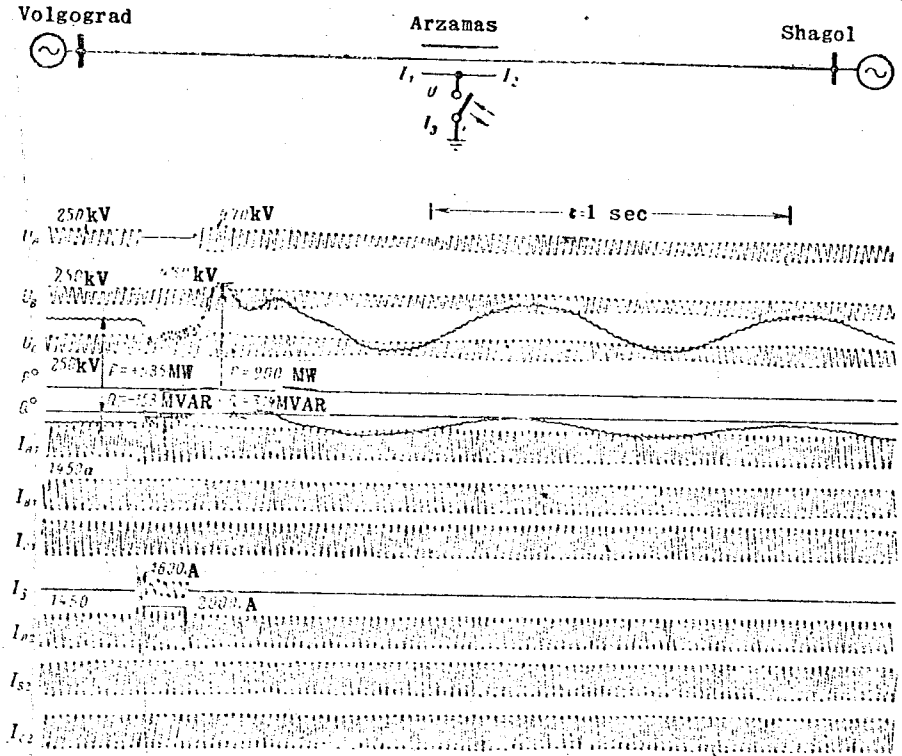


FIG. 7. Transient process at Arzamas substation in the presence of a single-phase short circuit (notation as in Fig. 5).

parts of the line and the load at the end of the line. The voltage rise in the middle of the line is greater for a greater angle of fluctuation. At the extreme angles, breakdown of the protective sparkgaps can occur, as the result of which the transmission will be disconnected and withdrawn from operation. To verify the dynamic characteristics of a tuned transmission, tests were carried out on the excitation of fluctuations caused by single-phase short circuits at Arzamas and Kuibyshev.

After the rise of active power to 635 MW at the sending end of the line (510 MW at the receiving end), a single-phase short circuit test was carried out at Arzamas (Fig. 7).

The oscillograms of the test showed that the short circuit lasted 0.14 sec and led to a sudden drop of the power to about 200 MW at the hydro-electric station HES. After clearing the short circuit, fluctuations were observed; firstly an amplitude of 990 MW active power at the sending end of the line, then followed by a reduction to 410 MW and a second maximum of 825 MW. The fluctuation period was about 0.8 sec. After a period of 5 sec the fluctuations practically ceased. The greatest surge factor in the fault process, recorded at Lipetsk substation, was 1.6. In the presence of fluctuations the maximum voltage was about 1.3. The difference between the maximum and minimum values of the angle between the angle of the HES generator and the 500 kV bus of Volgograd HES was  $28^\circ$  in the presence of fluctuations.

Later a further experiment was carried out with 530 MW initial output and for a short circuit increased to about 0.75 sec.

With a large margin of stability the transients in this second test were similar to those in the first test.

The single phase short circuit tests 0.25 and 0.27 sec on the bus-bars of Volgograd HES in transmitting 635 MW, were accompanied by a sudden drop of power about 290 MW.

The greatest surge factor in the transient process was observed at Lipetsk substation (1.95). There the surge factor was 1.3 - 1.9 before clearing the short circuit.

In clearing the short circuit, fluctuations set in with the following active powers occurring successively at the sending end of the line: first maximum 850 MW, minimum 440 MW, second maximum 730 MW. The difference between the maximum and minimum values of the angle between the generator of the sending HES and the bus-bars of Volgograd HES was  $28^\circ$  in the presence of fluctuations.

In order to discover how the transient voltages are influenced by the zero sequence parameters of a half-wave line, three single-phase short circuit tests were performed - on the 500 kV bus-bars of Lipetsk substation, of Lenin Volga HES and of Shagol substation - with the transmission unilaterally connected to the bus of Volgograd HES.

The short circuit duration was 0.19 sec for Liptsk, 0.26 sec for the

Lening Volga HES and 0.13 sec for Shagol.

An analysis of the oscillograms showed the greatest recorded surge factors in the transient process to be: 1.82 at Shagol for the Lipetsk short circuit, 1.75 at Lipetsk for the Lenin Volga HES fault, and 1.95 at Shagol itself for the Shagol fault.

The type of transient behaviour can be seen from the oscillograms in Fig. 8. The voltages in the transient process on the bus-bars of the supply station reached values of the order 1.20 for steady voltages of the order 1.1 for fault conditions.

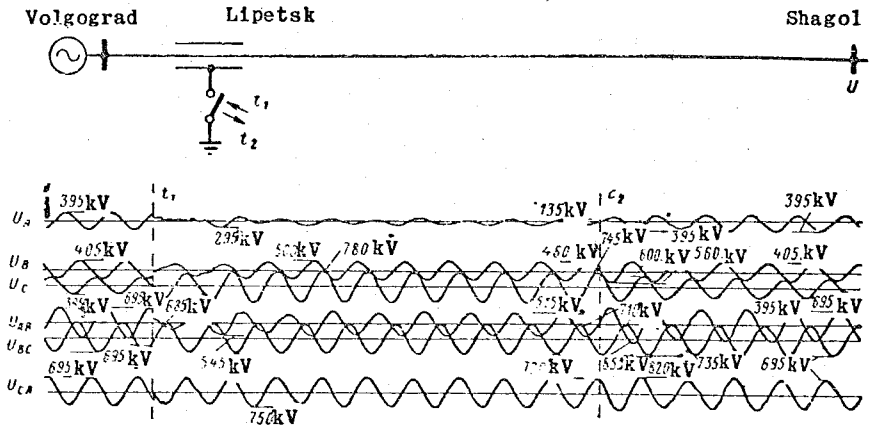


FIG. 8. Transient voltages at the end of the line (Shagol) with a single-phase short circuit on the Lipetsk substation bus-bars.

In order to discover the relation between the electromechanical and electromagnetic processes in a tuned transmission, tests were carried out on rough current stabilization with the transient voltages brought to magnitudes which cause the protective gaps to operate.

In the rough synchronization test with six generators in operation at the hydro-electric station, the earthing breaker at Arzamas was tripped with a current in the earthing circuit at 920 A (in the process of decrease of this current) and with an 0.1 c/s frequency difference. The first sudden increase of power was on the HES side and amounted to 1025 MW at the sending end of the line (the successive amplitudes were: -1025, +950, -640 MW). The synchronization was thus successful, but it was accompanied by very great fluctuations and overvoltages. The surge

multiple at the Lenin Volga HES was close to 1.9.

In the last test with still rougher synchronization, the earthing breaker was tripped with an 0.6 c/s frequency difference and an earthing circuit current at 1020 A (for increasing current).

On this occasion, as the fluctuations developed, the protective gaps operated and the transmission was disconnected. In the oscillographs the maximum surge factors were: 2.3 for phase A at Lenin Volga HES, 2.14 for phase C at Lipetsk, and 2.27 for phase B at Arzamas.

At this stage the testing was terminated. The results of the tests justified the following conclusions.

(1) The planned test programme was successfully and completely fulfilled for the Volgograd-Moscow-Kuibyshev-Urals tuned transmission. Along this line about 3000 km in length with minimal adjustments power was stably transmitted over the full range of load variation up to 1 million kW. There was scope for a further increase of the transmitted power according to transmitting conditions. The tuned transmission was well controlled; no difficulties were observed in the operation of the 500 kV gear in serial production (batch production).

(2) The test confirmed the theoretical conclusion that tuned transmissions are capable of transmitting power over extremely great distances providing some problems of reliability are solved.

(3) The results of tests in actual conditions are important for the further development of the theory of tuned transmissions; the phenomenon of parametric instability (self-oscillation, hunting) on generators was investigated and ways of suppressing it have been evolved; transient conditions have been arranged on the transmission, enabling a more refined study to be made of the influence of linear and non-linear parameters of long-distance transmissions on the course of electromagnetic and electro-mechanical processes, and permitting improved electrodynamic modelling of tuned transmissions.

(4) Means of switching in and synchronizing the tuned transmission were tried and tested. The test results show that these duties are successfully performed without special measures for damping fluctuations or limiting switching surges; voltage synchronization is more tranquil than current synchronization in a shunted line, but it involves slightly greater transient voltages in switching in the transmission.

(5) The special features of normal regulation for a tuned transmission

have been verified and the possibility of ensuring stable operation and suppressing hunting at inadequate angles of adjustment by high-response voltage regulators has been confirmed. Further research is however required to determine the optimum control law.

(6) The series of fault conditions organized in the loaded transmission showed that the transmission is stable in dynamic transitions to a relatively high degree. The switching surges which arose in these conditions and during single-phase short circuits with unilateral line supply, did not exceed the theoretical level calculated for the insulation of the 500 kV transmission. On disconnecting the no load line, the voltage amplitudes in the transient process do not exceed the steady state voltage in the preceding conditions. The oscillation on the line has almost completely decayed in 10 - 12 periods of supply frequency (50 c/s) after disconnection. The operating conditions for circuit breakers are very light. But the single-phase short circuit tests carried out so far do not provide adequate data as to the danger of switching surges in the event of faults on a tuned transmission. There is a need for further examination of the overvoltages possible in the presence of short circuits both on the transmission and in systems near the sending and receiving ends of the line. The same applies to the requirements which should be satisfied by the protective gear.

(7) By the use of existing schemes of relay protection and automatic control, along with a number of supplementary measures, the disconnection of the transmission in fault conditions has been assured. But, having regard to the special features of conditions in tuned transmissions, it is necessary to develop special relay schemes and automatic anti-fault control schemes.

In conclusion the authors wish to convey their thanks to all organizations and persons who have taken part in the above tests.

*Translated by O.M. Blunn*