

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ю. М. ШАХНАЗАРЯН

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕРКИ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ
 УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Асинхронный ход в сложной электрической системе вызывает периодические возмущения на синхронно работающую часть системы.

Наиболее полно это отражается при ресинхронизации генератора после кратковременного асинхронного хода, вызывая взаимные колебания роторов остальных генераторов, оставшихся в синхронной работе. При этом частоты выпуждающих сил действующих на роторы синхронно работающих генераторов в процессе изменения скольжения асинхронно работающего генератора могут достичь, и затем и превзойти их собственные частоты. В этом случае наблюдается явление перехода роторов отдельных генераторов через состояние резонанса.

Эти колебания в некоторых случаях достигают опасных амплитуд, и происходит нарушение устойчивости синхронно-работающих генераторов электрической системы.

Задачей настоящей работы является выявление условий устойчивости электрической системы, при нестационарном асинхронном режиме другой, соседней электрически связанной с ней части системы. Схематически будем рассматривать электрическую систему, состоящую из трех соизмеримых по мощности генераторов (станций), из которых „Г—З“ после кратковременного асинхронного хода ресинхронизируется (рис. 1а).

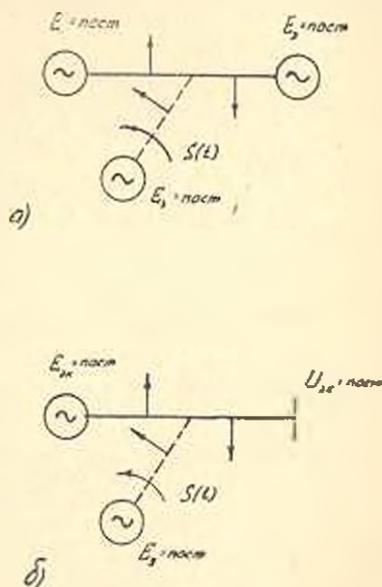


Рис. 1. Принципиальная схема системы из трех станций: а) основная схема; б) эквивалентная схема условной системы.

* Настоящая статья отражает материалы части работы выполняемой на кафедре электрических систем МЭИ под руководством проф. В. А. Венникова. При написании данной статьи автор использовал ценные советы А. В. Дабагяна.

При этом, оставшиеся в синхронизме генераторы „Г-1“ и „Г-2“* будут совершать малые колебания вокруг своих новых установившихся положений.

Возмущения, которые создает асинхронно работающий генератор „Г-3“, будем представлять, как действующую извне обобщенную силу, приложенную к колебательной системе роторов генераторов „Г-1“ и „Г-2“. Для получения дифференциального уравнения относительного движения роторов генераторов „Г-1“ и „Г-2“ будем пользоваться известным методом сведения уравнений движения двух генераторов к уравнению движения эквивалентного генератора работающего на шине неизменного напряжения (рис. 16).

При рассмотрении данной задачи сделаны следующие основные допущения:

1. Генераторы замещены переходными индуктивными сопротивлениями и приложенными за ними э. д. с.
2. Параметры генераторов, линий связи и нагрузок — линейны.
3. Скольжение ресинхронизируемого генератора происходит по линейному закону. Движение ротора этого генератора происходит при постоянном угловом ускорении.

Уравнение движения роторов двух генераторов „Г-1“ и „Г-2“:

$$T_{j1} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{11} - P_{12} \sin(\delta_{12} - \psi). \quad (1)$$

При этом

$$\left. \begin{aligned} T_{12} &= \frac{T_{j1} T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}}, \\ P_{11} &= \frac{T_{j1}}{T_{j1} + T_{j2}} \left(P_{11} - \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} \right) - \frac{T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}} \left(P_{12} - \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} \right), \\ P_{12} &= \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{j1} + T_{j2}} \sqrt{T_{j1}^2 + T_{j2}^2 + 2 T_{j1} T_{j2} \cos 2\alpha_{12}}, \\ \psi &= \arctg \left(\frac{T_{j2} - T_{j1}}{T_{j1} + T_{j2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. генераторов;

T_{j1} и T_{j2} — постоянные инерции;

δ_{12} — относительный угол;

P_{11} и P_{12} — мощности первичных двигателей;

Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} — собственные и взаимные полные сопротивления;

α_{11} , α_{22} , α_{12} — соответствующие дополнительные углы этих сопротивлений.

Подставляя уравнения (2) в уравнение движения эквивалентного генератора (1) и введя члены, учитывающие возмущения асинхронно-

* Предполагается, что генераторы „Г-1“ и „Г-2“ имеют одинаковые параметры.

работающего генератора на колебательную систему роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“; линеаризируя в окрестностях нового установившегося положения⁰ δ_{120} и пренебрегая членами с производными высшего порядка, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} = & \left[\frac{P_{11} - P_{11}^0}{T_{J1}} - \frac{P_{22} - P_{22}^0}{T_{J2}} \right] - \\ & - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos 2 \alpha_{12}} \times \\ & \times \sin \left[\delta_{120} - \arctg \frac{T_{J2} - T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \right] + D \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} - \\ & - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \times \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos 2 \alpha_{12} \cos \delta_{120}} - \\ & \arctg \frac{T_{J2} - T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \left| \Delta \delta_{12} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1}} \sin (\delta^0 t) - \alpha_{23} \right) + \\ & + \frac{E_2 E_1}{Z_{23}} \frac{1}{T_{J2}} \sin (\delta^0 t) - \delta_{120} + \alpha_{23} \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{11} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11}$; $P_{22} = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22}$.

Последние два члена представляют собою возмущения асинхронно работающего генератора на колебательную систему роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“.

В уравнении (3) член зависящий от скорости изменения угла определяет рассеивание энергии в данной колебательной системе. Это рассеивание связано с успокоительными моментами, возникающими при малых колебаниях генераторов „Г—1“ и „Г—2“, а также с наличием успокоительного момента, возникающего на валу эквивалентного генератора при асинхронном ходе генератора „Г—3“.

Рассеивание энергии от активных потерь можно учесть достаточно точно, пользуясь функцией рассеивания по Релею [1].

Успокоительные моменты, возникающие при колебаниях роторов генераторов, подсчитываются по известной формуле Жданова [2] (с учетом успокоительного момента и от обмотки возбуждения) в предположении, что генераторы „Г—1“ и „Г—2“ работают на приемные шины постоянного напряжения противоположного конца передачи.

При этом

$$D_{12} = D_1 \frac{T_{J2}}{T_{J1}} + D_2 \frac{T_{J1}}{T_{J2}},$$

где D_1 и D_2 — коэффициенты успокоения для случая работы генера-

⁰ Новое установившееся состояние наступит после сброса части активной мощности асинхронно работающим генератором и набором этой мощности на оставшуюся в синхронизме части системы.

торов на приемные шины постоянного напряжения противоположного конца передачи.

D_{3k} — коэффициент успокоения эквивалентного генератора.

Успокоительный момент на валу эквивалентного генератора из-за асинхронного хода генератора „Г—3“ можно учесть обычным уравнением [3], однако ввиду того, что скольжение этого генератора изменяется, момент этот будет переменным и коэффициент стоящий перед производным угла в уравнении (3) будет меняться во времени. Однако изменение коэффициента не может быть значительным ($s < 0,2$) и поэтому величина этого момента принималась постоянной и равной его максимальному значению.

Основные особенности процесса будут определяться возмущениями, которые отражены в последних членах уравнения (3).

Принимая обычно принятые обозначения [4] и опуская постоянные члены не зависящие от времени, выражение (3) запишем:

$$\frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta \delta_{12} = P \sin(\delta(t) + \lambda), \quad (4)$$

где

$$P = \sqrt{\left(\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}}\right)^2 + \left(\frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}}\right)^2 - 2 \left(\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}}\right) \left(\frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}}\right) \cos(\delta_{120} - \alpha_{23} + \alpha_{13})};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cdot \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos[\delta_{120} - K]}}$$

$$K = \arctg \frac{T_{J1} - T_{J2}}{T_{J1} + T_{J2}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{12}$$

$$\lambda = \arctg \frac{\frac{E_1 E_2}{T_{J1} Z_{13}} \sin \alpha_{13} - \frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}} \sin(\delta_{120} - \alpha_{23})}{\frac{E_1 E_2}{T_{J1} Z_{13}} \cos \alpha_{13} + \frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}} \cos(\delta_{120} - \alpha_{23})};$$

$2k$ — коэффициент затухания;

ω — угловая частота свободных колебаний генераторов работающих синхронно.

При $T_{J2} = \infty$ из (5) легко получить угловую частоту свободных колебаний генератора при работе его на шины бесконечной мощности.

Полагаем, что скольжение ресинхронизируемого генератора изменяется по линейному закону (рис. 2)

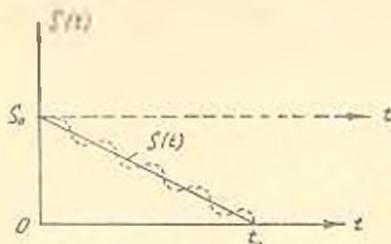


Рис. 2. Упрощенное представление движения ресинхронизируемого генератора.

$$s(t) = s_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right). \quad (6)$$

Изменение взаимных углов этого генератора относительно синхронно работающих генераторов, в предположении, что угол между двумя синхронно работающими генераторами закреплен, определяется из уравнения:

$$\delta(t) = \int_0^t s(t) dt + \delta_0 = S_0 \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) + \delta_0.$$

Уравнение определяющее характер колебаний угла $\Delta\delta_{12}$ запишется

$$\frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d\Delta\delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta\delta_{12} = P \sin \left[s_0 \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) + \varepsilon \right]. \quad (7)$$

С целью получения более удобных выражений для интегрирования, уравнение (7) напомним в новых координатах (рис. 2):

$$\frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d\Delta\delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta\delta_{12} = P \cos \left[- \left(\frac{\alpha t^2}{2} + \varepsilon \right) \right], \quad (8)$$

где α — среднее значение углового ускорения.

Интегрирование дифференциального уравнения (8) ведется в комплексной области [5–12].

Рассматривая комплексную переменную $Z(t)$, уравнение (8) при начальных условиях $Z(t) = \dot{Z}(t) = 0$, при $t = -\infty^*$ сводится к виду

$$Z(t) = \frac{1}{n} \int_{-i}^0 P e^{-k(t-\tau)} e^{-i\left(\frac{\alpha\tau^2}{2} + \varepsilon\right)} \cos [n(t-\tau) + \varphi] d\tau, \quad (9)$$

где $n^2 = \omega^2 - k^2$ и $z(t) = Re(\Delta\delta_{12})$.

Если перейти к показательным функциям и ввести переменные

$$u = -\frac{i-1}{2\sqrt{\alpha}} (\alpha\tau - n + ik),$$

$$v = \frac{i-1}{2\sqrt{\alpha}} (\alpha\tau + n + ik),$$

которые при $\tau = t$ принимают значения u_1, v_1 и при $\tau = 0 - u_0, v_0$ из (9) получим значение

$$z(t) = \frac{P(1+i)}{2n\sqrt{\alpha}} \left[e^{-u_1^2 - i\varphi} \int_{u_0}^{u_1} e^{u^2} du - e^{-v_1^2 + i\varphi} \int_{v_0}^{v_1} e^{v^2} dv \right] e^{-i\left(\frac{\alpha t^2}{2} + \varepsilon\right)}. \quad (10)$$

Интегралы, входящие в уравнение (10) определяются через интегралы Френеля. Для вычисления этих интегралов воспользуемся табулированными функциями интеграла вероятности от комплексного аргумента [10].

$$\bar{w}(z) = e^{-z^2} \left[1 + \frac{2i}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \right], \quad (11)$$

* При решении задач, где частота возмущения возрастает во времени, начальные условия следовало бы брать

$$Z(t) = \dot{Z}(t) = 0 \text{ при } t = 0$$

где $z = x + iy$.

При этом $w(z) = u(x, y) + i v(x, y)$.

Значения $u(x, y)$ и $v(x, y)$ для $y > 0$ приведены в этих таблицах.

Выражение (10) нетрудно привести к виду:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ e^{i\tau} w(v_1) - e^{-i\tau} w(v_1) - \right. \\ \left. - e^{i\tau + \alpha^2 - v_1^2} w(v_0) + e^{-i\tau + u_0 - u_1^2} w(u_0) \right\} e^{-i\left(\frac{\alpha t}{2} + \tau\right)}. \quad (12)$$

Последние два члена в выражении (12) представляют свободные колебания*, возникающие в результате переходного процесса. Для учета этих членов необходимо u_0 и v_0 соответственно заменить на u_∞ и v_∞ , т. е. на значения u и v при $t = -\infty$. После преобразования уравнение (12) приводится к виду:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ e^{i\tau} w(v_1) - e^{-i\tau} w(u_1) - \right. \\ \left. - 2e^{i\tau} e^{-v_1^2} \right\} e^{-i\left(\frac{\alpha t}{2} + \tau\right)}. \quad (13)$$

Учитывая равенство

$$w(-z) = 2e^{-z^2} - w(z), \quad (14)$$

получим:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ -e^{i\tau} w(-v_1) - e^{-i\tau} w(u_1) \right\} e^{-i\left(\frac{\alpha t}{2} + \tau\right)} = \\ = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot T \cdot e^{-i\left(\frac{\alpha t}{2} + \tau\right)}. \quad (15)$$

Расчетная формула может быть представлена:

$$|Z(t)| = \frac{P\sqrt{\pi}}{2n\sqrt{2\alpha}} \Phi(t) e^{-i\left(\frac{\alpha t}{2} + \tau + \varepsilon_0\right)}, \quad (16)$$

где

$$\Phi(t) = \sqrt{(ReT)^2 + (ImT)^2},$$

$$\varepsilon_0 = \arctg \frac{ImT}{ReT}.$$

В таблицах [10] значения $u(x, y)$ и $v(x, y)$ приведены для точек первого квадранта, лежащих в области

* В случае возрастания частоты помпущающей «силы» эти члены затухающие, и ими обычно пренебрегают.

$$0 \leq x \leq 5; 0 \leq y \leq 5.$$

Для определения значений функций в остальных точках плоскости $\omega(z)$ существует ряд простых формул [5].

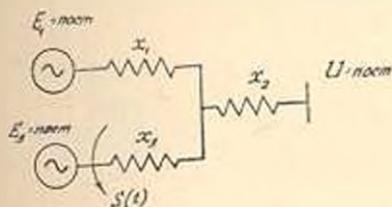


Рис. 3. Расчетная схема системы из трех станций, одна из которых представлена шиной бесконечной мощности. Параметры генераторов одинаковые: $x_d = 0,544$, $x'_d = 0,264$, $x_q = 0,420$, $x'_q = 0,204$, $x''_q = 0,200$, $T_d = 5,5$ сек, $T_J = 15,5$ сек, $x_1 = 0,71$, $x_2 = 0,11$, $x_3 = 1,07$. Сопротивления отнесены к напряжению 360 вольт.

На рис. 4 приведены амплитудные кривые при прохождении через резонанс для электрической системы представленной на рис. 3, где генератор „Г-3“, находясь в асинхронном режиме, ресинхронизируется. Кривые получены по изложенной методике расчета. На этом же рисунке представлены опытные кривые, полученные из осциллограмм для исследуемой схемы.

На рис. 5 представлена осциллограмма прохождения через резонанс для данной схемы. Включение регулятора возбуждения сильного действия на генератор „Г-1“ значительно уменьшает амплитуду колебаний взаимного угла.

дого действия на генератор „Г-1“ значительно уменьшает амплитуду колебаний взаимного угла.

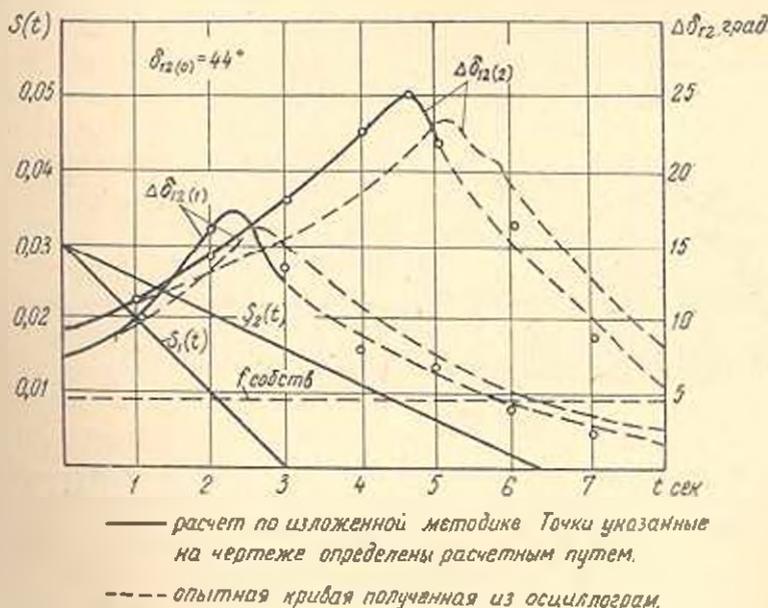


Рис. 4. Амплитудные кривые взаимного угла при прохождении через резонанс.

Из кривых рис. 4 видно, что максимум амплитуды имеет место не в момент совпадения частоты возмущающей „силы“ (скольжения) с собственной частотой системы станций находящихся в синхронизме.

а позже. При этом смещение тем больше, чем быстрее изменяется частота возмущающей „силы“. При больших амплитудах колебания взаимного угла, что может иметь место при прохождении через резонанс применение линеаризованных уравнений неправомерно³.

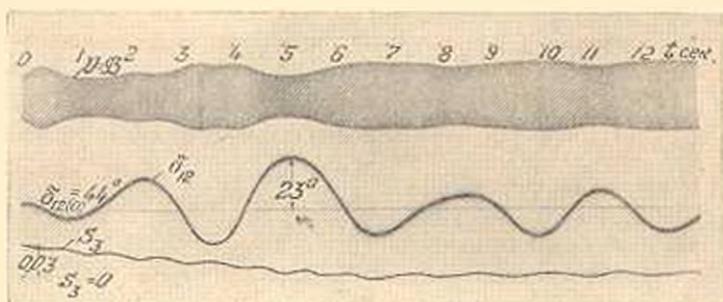


Рис. 5. Оциллограмма прохождения через резонанс, при асинхронном ходе генератора „Г-3“ схемы показанной на рис. 3.

При более полном рассмотрении данной задачи необходимо пользоваться уравнениями Горевы Парка. Однако и при этом аналитические решения практически невозможны. Естественным здесь является использование решающих устройств и, в частности, математических машин непрерывного действия. На рис. 5 представлена оциллограмма перехода через резонанс при втягивании в синхронизм асинхронно работающего генератора. Оциллограммы получены на математической модели типа МН-7. Мощность ресинхронизируемого ге-

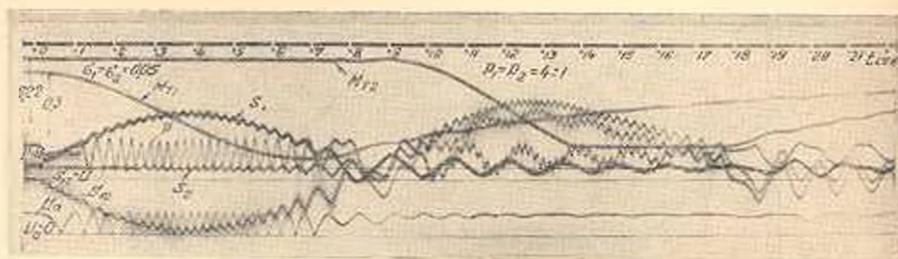


Рис. 6. Оциллограмма прохождения через резонанс для схемы: два генератора, работающие на линии бесконечной мощности через общий участок, полученная на математической модели. Соотношение мощностей генераторов $P_1 : P_2 = 4 : 1$. Параметры схемы $x_1 = 0,4$, $x_2 = 1,5$, $x_3 = 0,7$, $T_{11} = 16$ сек., $T_{12} = 4$ сек. Генераторы представлены переходными сопротивлениями.

нератора в четыре раза больше мощности генератора, находящегося в синхронизме. После перехода через резонанс генератор малой мощности теряет устойчивость. При обратном переходе через резонанс, при ресинхронизации генератора малой мощности, выпадение из синхронизма мощного генератора не последовало.

* Пределы применимости линеаризованных уравнений определены в [14].

З а к л ю ч е н и е

Оценку результирующей устойчивости дальнейшей электропередачи следует производить с учетом возможных нестационарных колебаний взаимных углов, при ресинхронизации отдельных генераторов и станций.

По методике изложенной в статье вынужденные колебания синхронно работающих генераторов, из-за периодического изменения взаимной синхронной мощности обусловленной асинхронно работающим генератором, могут вызвать переход роторов отдельных генераторов через состояние резонанса. Возможность ресинхронизации определяется соотношением мощностей станций.

Московский энергетический институт

Поступило 4.V 1961

ՅՈՒ. Մ. ՇԱՀՆԱԶԱՐՅԱՆ

**ՐԱՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ԳՈՒՄԱՐԱՅՈՒ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ՍՏՈՒԳՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱԼԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգիածում բերվում է բարդ էլեկտրական սիստեմներում աշխատող կալանի ասինխրոն քալի ազդեցութիւնը սիստեմի մնացած սինխրոն աշխատող մասի վրա: Ճուշ է արված, որ ասինխրոն աշխատող գեներատորի ռեհինխրոնիզացիայի դեպքում այդ ազդեցութիւնն առաջացնում է սինխրոնիզում գտնվող մնացած գեներատորների ռոտորների փոխադարձ տատանումներ: Այս դեպքում ասինխրոն աշխատող գեներատորների սահման փոփոխման պրոցեսում, սինխրոն աշխատող գեներատորների ռոտորների վրա դործող ստիպող ուժի հաճախականութիւնները կարող են հասնել լուծակնտե գերազանցել իրենց սեփական հաճախականութիւնները:

Իստվում է առանձին գեներատորների ռոտորների ռեգոնանսի դրութիւնով անցման երևույթը:

Այս տատանումները որոշ դեպքում հասնում են վտանգալոր ամպլիտուդայի, և տեղի է ունենում էլեկտրական սիստեմի սինխրոն աշխատող մասի կայունութեան խախտում:

Աշխատանքում հայտնաբերված է էլեկտրական սիստեմի կայունութեան պայմանը սիստեմի մյուս էլեկտրականորեն միացած մասի ոչ ստացվումար ասինխրոն ռեմիմի դեպքում:

Նալված է սիսեմատիկ սիստեմ լուղկացած 3 կայաններից, որից մեկը գտնվում է ասինխրոն քալում և ռեհինխրոնիզացվում է: Այս դեպքում ենթադրվում է, որ մյուս 2 կայանները ունեն նույն պարամետրերը:

Աշխատանքում տրվում է կայունութեան հաշվման մեթոդիկան տվյալ խնդրի համար: Յուշ է տրված, որ առաանվող սիստեմի ստացվիլիք դիֆերենցիալ հարասարումը, երբ թուլատրվում է, որ գրգռման ուժի հաճախականութիւնը փոխվի ցծալին օրենքով հաստատուն ամպլիտուդայով, բերում է Յրենելի ինտեգրալներին:

Սրանց որոշումը բերվում է հալանահանություն լնտեղրալի աղլուսակացված (տարուլայված) ֆունկցիալի կոմպլեքս արգումենտին (10):

Եւրագրված մեթոդով ստացված և ֆիզիկական մոդելի վրա կատարված փորձերի արդյունքները սալիս են լավ համընկում:

Աշխատանքը հնարավորություն է տալիս զնահատել հեռավոր էլիկորահաղորդման գումարալին կալունությունը, հարլի առնելով առանձին զեներատորների և կալանների ռետինխրոնիզացիալի զնայրում փոխադարձ անկունների հնարալոր, ոչ ստացիոնար ստատանոմները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Релей. Теория звука. Том 1, ГИТТЛ, М.—Л., 1955.
2. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, М.—Л., 1948.
3. Великов В. А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, М.—Л., 1958.
4. Бабаков И. М. Теория колебаний ГИТТЛ, М.—Л., 1958.
5. Дабазин А. В. Труды ВНИИ—электромеханики, том 1, вып. 2 М., 1960.
6. Казолский Е. Я. Переходные процессы при включении напряжения с изменяющейся частотой. Журн. «Электричество», № 11, 1949.
7. Кац А. М. Вынужденные колебания при прохождении через резонанс. «Инженерный сборник института механики», Изд. АН СССР, т. III, вып. 2, 1947.
8. Мамиконяцц Л. Г. Гоки и моменты асинхронных машин при изменении скорости их вращения. Журн. «Электричество», № 8, 1958.
9. Голоскоков Е. Г. и Филиппов А. П., К вопросу о переходе через резонанс упругих систем. Тр. ХПИ. Серия инженерно-физическая, Т. XIV, вып. 2, Харьков, 1958.
10. Фадеева В. И. и Терентьев И. М. Таблицы значений интеграла вероятности от комплексного аргумента. ГИТТЛ, М., 1954.
11. Lewis F. M. Vibration During Acceleration through a critical speed transactions of the A. S. M. E. vol. 54, No 23 (p. 2531), 1932.
12. Weldenhammer F. Das anlaufen eines ungedampfen schwingers mit massenkraftregelung. ZAMM. Akademie-verlagsgmbh. Berlin, 1958. band 38 s. 253—336.
13. Савалов С. А. и Соколов Н. Н. Влияние нарушения режима приемной энергосистемы на устойчивость дальних электропередач. Тр. ВНИИЭ IX, Госэнергоиздат, М.—Л., 1959.
14. Урусов И. Д. Липцевая теория колебаний синхронной машины. Изд. АН СССР, М.—Л., 1960.