

Э. Т. АБГАРЯН

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ КАК КОМПЕНСАТОР  
АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ  
НАПРЯЖЕНИЯ ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА

Как известно [1, 2], при моделировании больших синхронных генераторов малыми генераторами, наиболее затруднительным вопросом является получение необходимых постоянных времени роторных и статорных цепей. Частичное решение этого вопроса достигается при проектировании модели генератора на базе серийного [3]. При этом, несмотря на ряд принимаемых мер (недостаточное использование габаритной мощности генератора и др.) активное сопротивление цепи возбуждения остается повышенным и критерий подобия  $\frac{r}{x} = \text{idem}$  остается неудовлетворенным. Для получения указанного подобия бывает необходимо искусственно уменьшить активное сопротивление цепи возбуждения введением в нее коллекторной машины, создающей отрицательное активное сопротивление [4, 5]. Компенсатор активного сопротивления для данного случая специально проектируется и изготавливается по особому заказу.

Так как компенсатор может изменить сопротивление цепи возбуждения в 2—3 раза [6, 7], то требуемое от возбудителя напряжение в номинальном режиме генератора изменяется в широких пределах. Это обстоятельство препятствует непосредственному включению компенсатора и цепь возбуждения между обмоткой возбуждения и возбудителя, т. к. в этом случае было бы невозможно обеспечить работу возбудителя на соответствующем участке характеристики холостого хода.

В схеме МЭН связь между возбудителем и обмоткой возбуждения генератора осуществляется при помощи электромашинного преобразователя напряжения, независимая обмотка которого питается от возбудителя.

Как серийный компенсатор, так и преобразователь напряжения кроме секционированной серийной обмотки, компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов, снабжены также двумя вибраторными обмотками для уничтожения остаточного намагничивания. Эти обмотки питаются переменным током 50—100 гц от агрегата, со-  
З. Изв. ТН, № 4

стоящего из синхронного трехфазного генератора и двигателя постоянного тока [6].

Итак, в систему возбуждения модельного генератора в настоящее время входят: сериесный компенсатор, преобразователь напряжения и возбудитель генератора, а также агрегат для питания vibratorных обмоток.

Необходимо отметить, что сериесный компенсатор и преобразователь напряжения проектируются отдельно для каждого конкретного генератора-модели и изготавливаются нашими заводами по специальному заказу. Компенсатором активного сопротивления цепи возбуждения генератора модели может служить также электромашинный усилитель, являющийся одновременно преобразователем напряжения.

Используя имеющуюся возможность питания обмоток управления ЭМУ от электронного усилителя, можно коэффициент усиления в разомкнутом состоянии резко повысить и, применяя глубокую отрицательную обратную связь по напряжению, получить очень стабильную характеристику усиления. Это исключит необходимость в vibratorных обмотках и в агрегате для их питания. При этом схема получается компактной, легко осуществимой и экономичной.

Показать возможность применения ЭМУ в вышеописанной схеме является основной целью данной работы. Настоящая работа выполнена в ВЭНИ АН Армянской ССР, где и осуществлена указанная схема.

### Схема без отрицательной обратной связи

Возможность использования ЭМУ в качестве компенсатора активного сопротивления и преобразователя напряжения цепи возбуждения модели синхронного генератора основывается на следующем.

Пусть ЭМУ включен в цепь возбуждения генератора по схеме рис. 1. На обмотку управления 1 подается напряжение  $U_1$  от возбудителя, которому соответствует  $U_{н1}$ , на выходе ЭМУ. К обмотке 2 под-

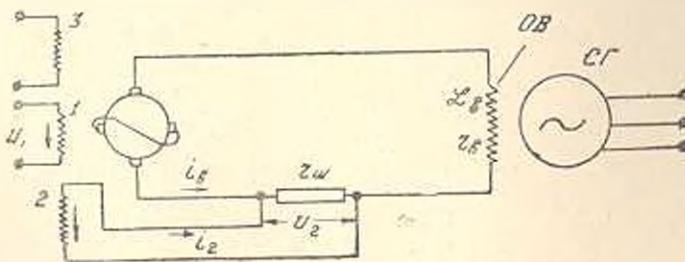


Рис. 1.

ведено напряжение  $U_2$ , пропорциональное току  $i_1$ , протекающему в цепи возбуждения, т. е. на выходе ЭМУ получаем напряжения  $U_{н2}$ .

пропорциональное току возбуждения. При прямолинейности характеристики холостого хода эта слагающая напряжения якоря ЭМУ равна:

$$U_{a2} = k i_a r_{ш}. \quad (1)$$

Уравнение цепи возбуждения генератора имеет вид:

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} = i_a (r_a + r_{ш}) + L_a \frac{di_a}{dt}. \quad (2)$$

Откуда, с учетом (1),

$$U_{a1} = i_a (r_a - r_{ш}) + L_a \frac{di_a}{dt} - k i_a r_{ш}$$

или

$$U_{a1} = i_a [r_a - r_{ш} (k - 1)] + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad (3)$$

где  $L_a$  — индуктивность обмотки возбуждения синхронного генератора,  $k$  — коэффициент усиления ЭМУ по напряжению,

$r_{ш}$  — сопротивление для осуществления положительной обратной связи по току.

Таким образом, получается эффект компенсации активного сопротивления цепи возбуждения: вместо естественного сопротивления  $r_a$  имеем  $r_a - r_{ш} (k - 1)$ .

В этой схеме преобразователем напряжения возбудителя является контур обмотки управления 1 и якорь ЭМУ с выходным напряжением  $U_{a1}$ , а компенсатором активного сопротивления — контур обмотки управления 2 и якорь ЭМУ с выходным напряжением  $U_{a2}$ .

Для устойчивости схемы необходимо, чтобы как в установившемся, так и в переходном режиме удовлетворялось условие

$$r_a > r_{ш} (k - 1). \quad (4)$$

Для получения желаемого (стабильного) качества компенсации необходимо, чтобы величина отрицательного сопротивления при данной степени компенсации, независимо от величины и характера изменения тока возбуждения  $i_a$ , осталась постоянной. Это возможно при стабильном коэффициенте усиления ЭМУ. Коэффициент усиления ЭМУ из-за петли гистерезиса и других нелинейностей имеет определенную неустойчивость, которую можно компенсировать, применяя обратную отрицательную связь.

### Схема с отрицательной обратной связью

Покажем, что ввод отрицательной обратной связи в ЭМУ (и вообще в компенсатор) улучшает качество компенсации активного сопротивления и тем самым увеличивает диапазон компенсации при допустимых ошибках. Для этого достаточно показать, что изменение величины, оставшегося после компенсации сопротивления, от неста-

близности коэффициента усиления, уменьшается с вводом обратной связи по напряжению в ЭМУ.

На рис. 2 изображена схема цепи возбуждения модельного генератора, где в ЭМУ введена жесткая отрицательная обратная связь.

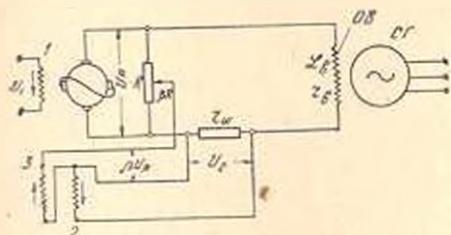


Рис. 2.

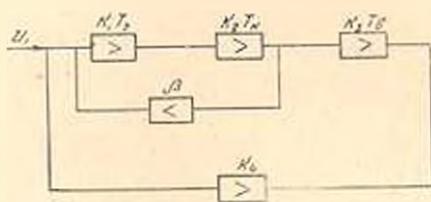


Рис. 3.

На рис. 3 представлена структурная схема этой цепи регулирования, где ЭМУ представлен двумя последовательно включенными апериодическими звеньями [8].

Операторное уравнение этой системы регулирования имеет вид:

$$|1 - T_1 p|(1 + T_2 p)(1 + T_3 p) + k_1 k_2 \beta (1 + T_3 p) - k_1 k_2 k_3 k_4| i_n = k_1 k_2 k_3 U_1$$

или, выражая в виде передаточной функции:

$$\frac{i_n}{U_1} = \frac{k_1 k_2 k_3}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)(1 + T_3 p) + k_1 k_2 \beta (1 + T_3 p) - k_1 k_2 k_3 k_4}, \quad (5)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — соответственно коэффициенты усиления по напряжению первого и второго каскадов усиления ЭМУ.

$$k_3 = \frac{1}{r_n + r_m},$$

$k_1 = r_m$  — коэффициент положительной обратной связи,

$\beta$  — коэффициент отрицательной обратной связи,

$T_1$  — постоянная времени обмотки управления ЭМУ,

$T_2$  — постоянная времени короткозамкнутой цепи ЭМУ,

$T_3$  — постоянная времени цепи возбуждения генератора.

При  $i_n = \text{const}$  из (5) следует

$$\frac{i_n}{U_1} = \frac{k_1 k_2 k_3}{1 + k_1 k_2 \beta - k_1 k_2 k_3 k_4} \quad \text{или} \quad \frac{U_n}{U_1} = \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 k_2 \beta - k_1 k_2 k_3 k_4}. \quad (6)$$

С учетом того, что

$$U_n = U_1 \frac{k_2 k_3}{1 + k_1 k_2 \beta}$$

в соответствии с (1) и (2) получим:

$$\frac{r_n + r_m}{(r_n + r_m) - k r_m} = \frac{1 + \beta k_1 k_2}{1 + k_1 k_2 \beta - k_1 k_2 k_3 k_4} = n, \quad (7)$$

где  $n$  — будет кратностью компенсации активного сопротивления цепи возбуждения.

Уравнение (7) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{k_1 k_2}{1 + \beta k_1 k_2} k_3 k_4 = \frac{n-1}{n} = 1 - \Delta r_{вк}, \quad (8)$$

где  $\Delta r_{вк} = \frac{(r_{вк} + r_{ш}) - k r_{ш}}{r_{вк} + r_{ш}}$  — относительное сопротивление цепи возбуждения с учетом компенсации.

Введем обозначения:

$$x = \frac{k_1 k_2}{(k_1 k_2)_p}; \quad \alpha = \frac{1}{(k_1 k_2)_p},$$

где  $(k_1 k_2)_p$  — расчетный коэффициент усиления ЭМУ.

Решение (8) относительно  $\Delta r_{вк}$  при принятых обозначениях будет иметь вид:

$$\Delta r_{вк} = 1 - \frac{x}{\alpha + \beta x} (\alpha + \beta) \frac{n-1}{n}. \quad (9)$$

При отсутствии отрицательной обратной связи уравнение принимает вид:

$$\Delta r_{вк} = 1 - x \frac{n-1}{n}. \quad (10)$$

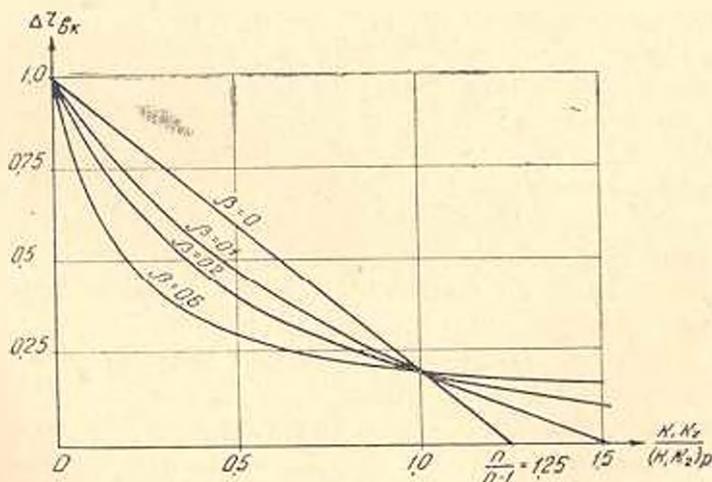


Рис. 4.

На рис. 4 приведены связи  $\Delta r_{вк} = f(x)$  для  $\beta = 0; 0.1; 0.2; 0.6$  при  $n = 5$  и  $\alpha = 0.1$ . Из построенных кривых видно, что непостоянство  $\Delta r_{вк}$ , вызванное нестабильностью коэффициента усиления ЭМУ, уменьшается с вводом в ЭМУ отрицательной обратной жесткой связи, причем тем больше, чем больше коэффициент обратной связи.

Эксперименты проводились на модельном генераторе динамической модели гидроэнергосистемы ВЭНИ АН Армянской ССР [9].

В цепь возбуждения модельного генератора был включен электромашинный усилитель типа ЭМУ-12 А согласно схеме рис. 2.

Были сняты осциллограммы тока цепи возбуждения при скачкообразном повышении напряжения возбудителя и тока возбуждения, при коротком замыкании на зажимах генератора для компенсаций различных кратностей.

Кратность компенсации изменялась путем изменения  $r_{ш}$ . Несмотря на то, что в опытах нарастание тока шло по экспоненте, при вылете тока остаточный ток составлял 40% от первоначального.

Проанализируем полученные результаты. Модельный генератор, на котором производились эксперименты, имеет активное сопротивление обмотки возбуждения  $r_n = 5,5$  ом и постоянную времени  $T_{до} = 0,17$  сек. Для получения необходимой постоянной времени  $T_{эм} = 4 \dots 5$  сек сопротивление обмотки возбуждения должно быть скомпенсировано до величины  $r_{вк} = 0,187$  ом. При столь малой величине  $r_{вк}$  остаточное напряжение компенсатора (если отсутствует специальная противостерезисная обмотка) может вызвать в цепи возбуждения ток, несколько раз превышающий номинальный.

Использование в предлагаемой схеме обратной отрицательной связи по напряжению ЭМУ позволило до некоторой степени уменьшить искажающее влияние петли гистерезиса и нелинейности характеристики ЭМУ.

Однако влияния этих факторов в данном случае остались еще значительными из-за крайней малости  $r_{вк}$ . При таком  $r_{вк}$  даже незначительные изменения напряжения ЭМУ вследствие гистерезиса приводят к значительным изменениям тока возбуждения. С увеличением  $r_{вк}$ , т. е. с уменьшением степени компенсации,  $\Delta i_a^0/\%$  будет уменьшаться и при малых ( $n = 3 \dots 6$ ) компенсациях достигнет практически пренебрежимых величин.

Сравнение осциллограмм всплеска тока при  $n = 20$  и при  $n = 1$  показало, что схема вносит искажение в начальную часть изменения тока. В первом периоде броска тока ЭМУ не компенсирует, т. е. ток в контуре обратной связи запаздывает.

Ввиду того, что влияние запаздывания в контуре обратной связи на медленные изменения тока  $i_b$  (при  $T_n \gg T_{эм}$ ) весьма незначительно, данную схему можно применять при регулировании возбуждения генераторов, качаниях ротора и синхронном самовозбуждении, работая с малыми степенями компенсации ( $n = 3 \dots 6$ ).

Однако, в ряде случаев (при несимметричных режимах, коротких замыканиях, асинхронном самовозбуждении, сбросах и набросах нагрузки и т. д.) возникают вынужденные изменения тока возбуждения с частотой  $f = 50 \dots 100$  гц, при которых влияние запаздывания в контуре обратной связи [10] уже не может не учитываться. Все эти



в цепь управления ЭМУ электронного усилителя в разомкнутом состоянии, будет равен:

$$k_{об} = k_2 k = 30 \cdot 25 = 750.$$

Общий коэффициент усиления  $k_{об}$ , двухкаскадного усилителя (ЭМУ и электронный усилитель), охваченного отрицательной обратной связью, в нашем случае будет равен:

$$k_{об} = \frac{k_{об}}{1 + \beta k_{об}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{об}} + \beta}.$$

Т. к.

$$\frac{1}{k_0} = \frac{1}{750} = 0,0013 \gg \beta = 0,4,$$

то

$$k_{об} \approx \frac{1}{\beta} = 2,5,$$

т. е.  $k_{об}$  не зависит от  $k_{об}$ , следовательно, и от его неустойчивости.

Зависимость (10) в этом случае примет вид:

$$\Delta r_{нк} = 1 - \frac{n-1}{n}. \quad (11)$$

т. к.  $\beta \ll 1$ .

Это показывает, что  $\Delta r_{нк}$  не зависит от неустойчивости коэффициента усиления ЭМУ.

Иными словами, имея ввиду значительное уменьшение постоянной времени ЭМУ, будем иметь очень высокое качество регулирования. При этом учитывается и то, что схема исключает возможность влияния взаимной индукции обмоток управления ЭМУ на качество регулирования. В этом случае изменения величины токов в обеих обмотках управления ЭМУ по абсолютной величине равны между собой и не сдвинуты по времени.

Для проверки компенсирующего действия схемы при медленных и быстрых изменениях тока были сняты кривые нарастания тока и всплеск тока в цепи возбуждения. Во время экспериментов в цепь возбуждения вводилось дополнительное сопротивление  $R_2$ . Эксперименты проводились дважды—при  $R_2 = 0$ , когда схема не работала в режиме компенсатора и при  $R_2 = 12 \text{ ом}$ , когда схема работала в режиме компенсатора с отрицательным сопротивлением, равным  $R_2$ .

Анализ полученных результатов показал, что как при медленных, так и при быстрых изменениях тока компенсирующее действие схемы не зависит от величины тока цепи возбуждения в интересующих нас пределах (до  $5-6 = i_{нн}$ ), форма кривых тока не искажается, остаточный ток после всплеска практически равен нулю.

После проверочных экспериментов схема была смонтирована и включена в цепь возбуждения модели генератора. На рис. 6 приведена зависимость постоянной времени цепи возбуждения модельного генератора СГ-6,25 от положения движка реостата отрицательной об-

ратной связи. Как видно из кривой,  $T_{до}$  по данной шкале можно плавно менять от 1,5 до 6,7 сек\*

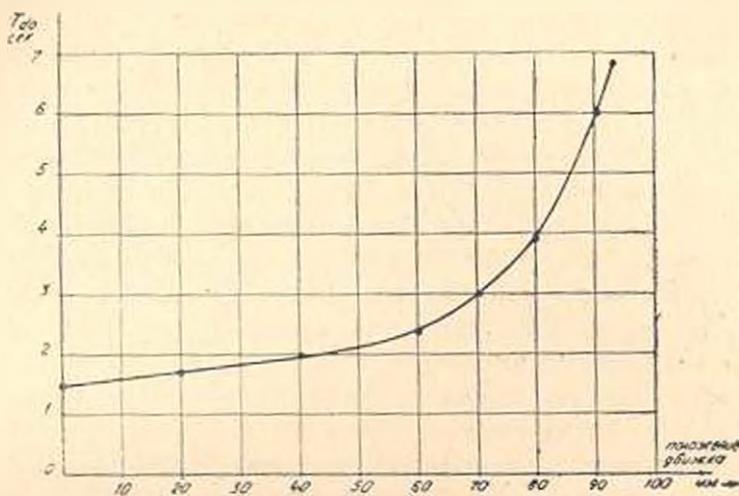


Рис. 6.

Для проверки схемы было произведено трехполюсное короткое замыкание на зажимах статора СГ-6,25 при различных степенях компенсации.

На рис. 7 представлена осциллограмма всплеска тока  $i_n$  при трехполюсном к. з. на зажимах генератора при отсутствии компенсации.

На рис. 8 представлена осциллограмма тока и напряжения цепи возбуждения и тока статора при трехполюсном к. з. и при 35 кратной компенсации.

Эти осциллограммы подтверждают, что схема практически не имеет запаздывания и не вносит искажений в кривую изменения то-

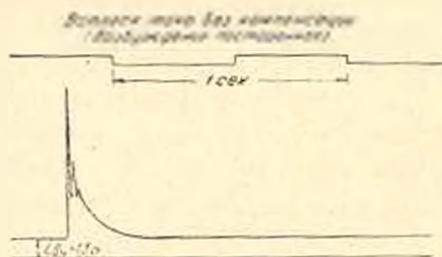


Рис. 7.

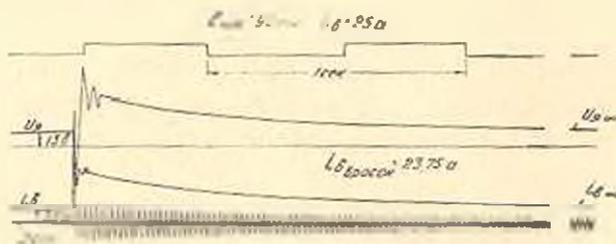


Рис. 8.

\* Кроме этой шкалы можно получить и другие путем изменения диапазона установки в посредством изменения плеча сопротивления в том или ином направлении. Практически можно изменять  $T_{до}$  от 0,17 сек до 17 сек.

ка—нет заглужения в броске и остаточный ток практически равен нулю.

Опытно-теоретические исследования показали, что электромашиный усилитель, включенный в цепь возбуждения модельного генератора и имеющий положительную обратную связь по току и отрицательную—по напряжению, может быть использован в качестве компенсатора активного сопротивления и преобразователя напряжения цепи возбуждения.

Для повышения диапазона и качества компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения, необходимо в электромашиный усилитель (и вообще в компенсатор) вводить обратную отрицательную связь по напряжению; чем глубже связь, тем больше диапазон компенсации при допустимых ошибках.

При исследованиях режимов, при которых ток возбуждения синхронного генератора изменяется медленно и требуется небольшая компенсация активного сопротивления, можно применить схему без электронного усилителя. При быстрых изменениях тока  $i_d$  и при больших компенсациях следует применять схему ЭМУ с электронным усилителем в цепи управления. При этой схеме постоянную времени цепи возбуждения модельных генераторов можно увеличить до практически необходимых значений.

Схема ЭМУ с электронным усилителем с точки зрения устойчивости и качества регулирования, как при медленных, так и при быстрых изменениях тока возбуждения модельного генератора во всем диапазоне компенсации ведет себя удовлетворительно.

Автор пользуется случаем выразить глубокую благодарность профессору В. А. Веникову за ценные указания, сделанные при выполнении данной работы.

Водно-энергетический институт Академии наук  
Армянской ССР

Поступило 28 II 1958

Է. Տ. ԱՎԿԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՄԵԿԱՆԻԿԱՅԻ, ՈՒՅԵՂԱՑՈՒՅԻՉԸ ՈՐՊԵՍ ՄՈՒԿԵԼԱՅԻՆ  
ԴԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ԴՐԴԻՄԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ԱԿՏԻՎ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ  
ԿՈՄՊԵՆՍԱՏՈՐ ԵՎ ԼԱՐՄԱՆ ՎԵՐԱՓՈԿԵՐ

Ա մ փ ո փ ո ՝ մ

Հոդու սինխրոն գեներատորները փոքրերով մտցելուցնելու մամանակ  
սովնազմվարին հարցերից մեկը գրգռման շղթայի մամանակի հաստատունի  
համապատասխան արժեք ստանալն է (փոքր գեներատորներում դրանք շատ  
փոքր են): Չնայած նախազգիման ընթացքում մեզք ստնվող մի շարք մի-  
ջոցատուններին, մողելային գեներատորի գրգռման շղթայի ակտիվ դիմադրու-

թլուներ մնում է համեմատաբար մեծ և նմանություն կրիտիկիան՝  $\frac{r}{x} = idem$ ,

մնում է չբավարարված: Նմանությունն ստանալու համար անհրաժեշտ է լինում արհեստականորեն զրգուման շղթայի դիմադրությունը փոքրացնել, մտցնելով այդ՝ շղթայի մեջ բացասական դիմադրություն ստեղծող կոլլեկտորային մեքենա [4, 5]:

Արտիճևոս կոմպենսատորը կարող է փոփոխել զրգուման շղթայի դիմադրությունը 2—3 անգամ [6, 7]։ սույն զրգուիչից պահանջվող լարումը ղեկնորատորի նախնայ սեփական փոփոխվում է լաշն սահմաններում: Այս հանդամանքը ստիպում է, որ կոմպենսատորն անմիջապես չմտցվի զրգուման շղթա: Առավելի էներգետիկ ինստիտուտի սխեմայում զրգուիչի և զրգուման փաթակի միջև կապը իրազործվում է էլեկտրամեքենային վերափոխիչի միջոցով: Կոմպենսատորի և վերափոխիչի մնալան լարումը վերացնելու համար այդ մեքենաներն անհեն հակահիստերեզիսային փաթակի մեքենա, որոնք սնում են ստանում լարձը հաճախականության աղբյուրայից: Ինչպես կոմպենսատորը, այնպես էլ վերափոխիչը նախադժվում են ամեն մի կմնկրես մոդելի համար և մեր գործարանների կողմից ընդունվում են որպես հասակ պատվեր:

Հույսովամ գետեղված թեորետիկ և էքսպերիմենտալ հետազոտությունները ցույց են ապրես, որ մոդելային ղեկնորատորի զրգուման շղթա մտցված էլեկտրամեքենային ուժեղացուցիչը, որն ունի դրական հետադարձ կապ բառ հոսանքի և բացասական՝ բառ լարման, կարող է ծառայել միաժամանակ որպես այդ շղթայի ակտիվ դիմադրության կոմպենսատոր և լարման վերափոխիչ: Դիմադրության կոմպենսացիայի դիապազոնը և որակը մեծացնելու համար անհրաժեշտ է էլեկտրամեքենային ուժեղացուցիչում (և ընդհանրապես կոմպենսատորում) մտցնել հետադարձ բացասական կապ բառ լարման Բնդորում, ինչպես մեծ է կապի խորությունը, այնքան մեծ է կոմպենսացիայի դիապազոնը մաքսիմալ թուլությունի սխեմերով: Կապի խորությունը մեծացված է էլեկտրամեքենային ուժեղացուցիչի ղեկավարման շղթայում մրացրված էլեկտրամեքենային ուժեղացուցիչի միջոցով:

Մի շարք սեփականի ուսումնասիրված մամանակ, երբ սինխրոն ղեկնորատորի զրգուման հոսանքը փոփոխվում է գանդող և երբ պահանջվում է ակտիվ դիմադրության ոչ մեծ կոմպենսացիա, կարելի է այտադրծիկ առանց էլեկտրոնային ուժեղացուցիչի սխեման (նկ. 2):

Գրգուման հոսանքի արագ փոխախման և ակտիվ դիմադրության մեծ կոմպենսացիայի անհրաժեշտության մամանակ անհրաժեշտ է այտադրծիկ սխեման (նկ. 3), որամ էլեկտրամեքենային ուժեղացուցիչի ղեկավարման շղթայում մտցված է էլեկտրոնային ուժեղացուցիչը: Այս սխեմայի միջոցով մոդելային ղեկնորատորի զրգուման շղթայի մամանակի հաստատունը կարելի է մեծացնել մինչև պրակտիկորեն անհրաժեշտ չափու Ախման, կարանություն և կանոնավորման արակի տեսանկյունից, ինչպես մոդելային ղեկնորատորի զրգուման հոսանքի գանդող, այնպես էլ արագ փոփոխման մամանակ իրեն պահում է անբասիր:

Տվյալ սխեման իրազործված է Ջրա-էներգետիկ ինստիտուտի էներգետիկաների մոդելացման լաբորատորիայում: