

Есимханов С.Б., Сапа В.Ю., Шыныбай Ж.С.

*Казахский национальный аграрный университет*

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

### **Аннотация**

Составлены дифференциальные уравнения синхронного генератора и асинхронного двигателя, а также уравнения связи, учитывающие параметры соединительных кабелей.

В относительных единицах составлены системы уравнений переходных процессов системы автономного электропривода, которые позволяют изучить динамику системы в различных режимах работы. При этом за переменную состояния принят ток.

Путем проведения численных экспериментов с помощью математической модели проведен анализ переходных процессов в системе электропривода. Моделирование показало работоспособность проектируемой системы автономного асинхронного электропривода.

**Ключевые слова:** автономный электропривод, переходные процессы, синхронный генератор, асинхронный двигатель, моделирование, математическая модель, дифференциальные уравнения.

### **Введение**

В общем случае комплект электрифицированного ручного инструмента с автономным электроснабжением состоит из первичного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), генератора электрической энергии приводимого от ДВС, аппаратуры управления и защиты, кабельной линии и собственно ручного инструмента с приводным двигателем.

В ходе работы системы электропривода в различных режимах работы, изменяются такие параметры системы, как - скорость, ток и напряжение, т.е. возникают переходные процессы, оказывающие непосредственное влияние на устойчивость системы. В общем случае, переходными режимами, оказывающими наибольшее влияние на устойчивость работы системы, являются пуск электродвигателя, особенно когда к генератору подключены несколько инструментов и их суммарная мощность соизмерима с мощностью генератора, и перегрузка двигателя в ходе выполнения технологической операции. Только в случае предварительного расчета переходных процессов в системе, можно с наименьшими затратами осуществить правильный выбор оборудования [1,2]. При этом необходимо учесть особенности конструкции электрических машин, падение напряжения в кабельной линии и электромагнитную инерцию индуктивностей в электрической цепи.

### **Материалы и методы исследований**

Переходные процессы в системе электропривода целесообразно исследовать путем проведения численных экспериментов на вышеприведенной математической модели. Для решения дифференциальных уравнений использовалась программа «MathCAD».

Особенностью конструкции разработанного генератора является то, что индуктором является статор, а якорем ротор. Обмотка якоря соединена по схеме «звезда». На статоре, кроме обмотки возбуждения, расположена демпферная обмотка.

Уравнения приведены к системе координат с двумя осями ( $x$ ,  $y$ ). Физически это означает переход к двухфазной машине с магнитными осями фазных обмоток сдвинутых на  $90^0$ эл. Соответствующая эквивалентная схема идеализированной двухфазной системы синхронный генератор – асинхронный двигатель приведена на рисунке 1.

В нашем случае целесообразно использовать систему осей вращающихся вместе с ротором, совместив ось  $x$  с продольной осью двухфазного ротора  $d$ , совпадающей с осью  $A$  исходной трехфазной обмотки. Поперечную ось обозначим через  $q$  [2].

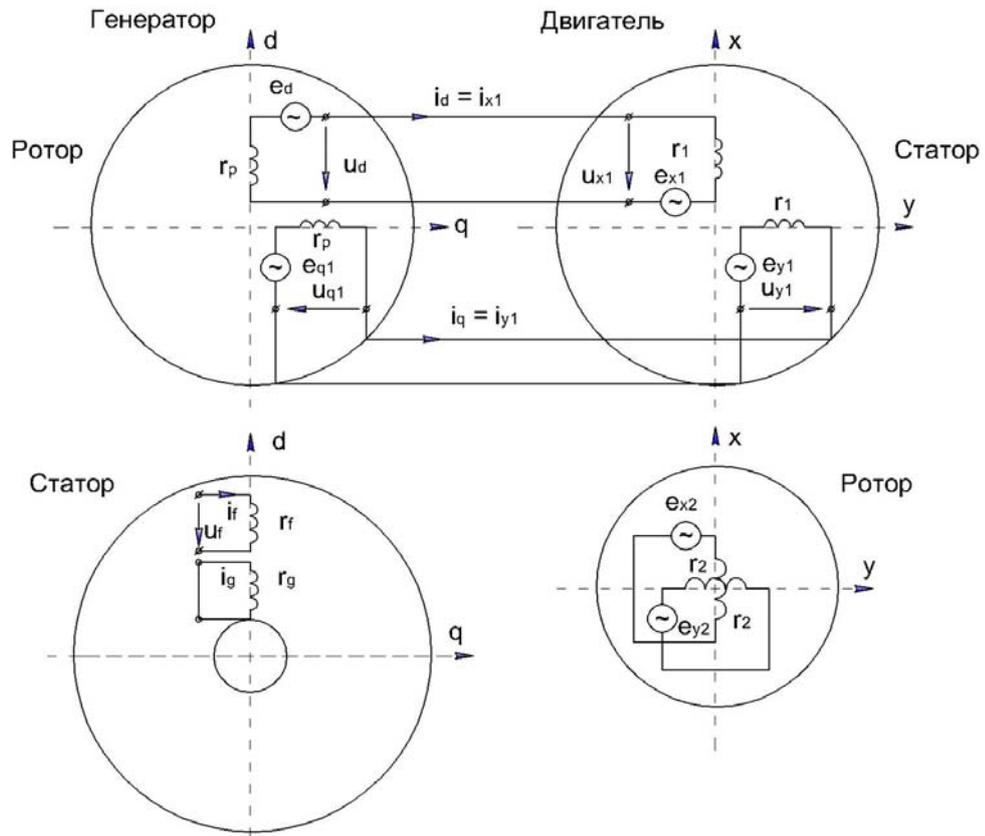


Рисунок 1 – Эквивалентная схема идеализированной двухфазной системы синхронный генератор – асинхронный двигатель

Уравнения системы автономного электропривода целесообразно записывать в относительных единицах. Переход к системе относительных единиц упрощает запись уравнений, облегчает вычисления и делает возможным сравнение результатов, получаемых для машин различной мощности [3].

### Результаты исследований и их обсуждение

*Дифференциальные уравнения синхронного генератора.*

Уравнения напряжений синхронного генератора в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\underline{\psi}_d}{d\tau} &= -\underline{u}_d - \underline{\omega} \cdot \underline{\psi}_q - \underline{r}_p \cdot \underline{i}_d; & \frac{d\underline{\psi}_q}{d\tau} &= -\underline{u}_q + \underline{\omega} \cdot \underline{\psi}_d - \underline{r}_p \cdot \underline{i}_q \\ \frac{d\underline{\psi}_f}{d\tau} &= \underline{u}_f - \underline{r}_f \cdot \underline{i}_f; & \frac{d\underline{\psi}_\delta}{d\tau} &= -\underline{r}_\delta \cdot \underline{i}_\delta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } \underline{U}_d &= \frac{U_d}{U_\delta}; & \underline{U}_q &= \frac{U_q}{U_\delta}; & \underline{\psi}_d &= \frac{\psi_d}{\psi_\delta}; & \underline{\psi}_q &= \frac{\psi_q}{\psi_\delta}; & \underline{\omega} &= \frac{\omega}{\omega_\delta}; & \underline{i}_d &= \frac{i_d}{I_\delta}; & \underline{i}_q &= \frac{i_q}{I_\delta}; \\ \underline{U}_f &= \frac{U_f}{U_{f\delta}} \end{aligned} \right\}$$

$$\underline{\psi}_f = \frac{\psi_f}{\psi_{f\delta}}; \quad \underline{\psi}_\delta = \frac{\psi_\delta}{\psi_{\delta\delta}}; \quad \underline{i}_f = \frac{i_f}{I_{f\delta}}; \quad \underline{i}_\delta = \frac{i_\delta}{I_{\delta\delta}}; \quad \underline{r}_p = \frac{r_p}{Z_\delta}; \quad \underline{r}_f = \frac{r_f}{Z_{f\delta}}; \quad \underline{r}_\delta = \frac{r_\delta}{Z_{\delta\delta}}$$

Потокоцепления в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \underline{\psi}_d &= \underline{L}_d \cdot \underline{i}_d + \underline{M}_{Af} \cdot \underline{i}_f + \underline{M}_{A\delta} \cdot \underline{i}_\delta; \quad \underline{\psi}_q = \underline{L}_q \cdot \underline{i}_q; \\ \underline{\psi}_f &= \underline{M}_{Af} \cdot \underline{i}_d + \underline{L}_f \cdot \underline{i}_f + \underline{M}_{f\delta} \cdot \underline{i}_\delta; \quad \underline{\psi}_\delta = \underline{M}_{A\delta} \cdot \underline{i}_d + \underline{M}_{f\delta} \cdot \underline{i}_f + \underline{L}_\delta \cdot \underline{i}_\delta \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\text{где } \underline{M}_{Af} = \frac{M_{Af}}{L_\delta K_f}; \quad \underline{M}_{A\delta} = \frac{M_{A\delta}}{L_\delta K_\delta}; \quad \underline{M}_{f\delta} = \frac{M_{f\delta}}{L_\delta K_\delta K_f}; \quad \underline{L}_d = \frac{L_d}{L_\delta K_\delta^2}; \quad \underline{L}_f = \frac{L_f}{L_\delta K_f^2};$$

$$\underline{L}_d = \frac{L_d}{L_\delta}; \quad \underline{L}_q = \frac{L_q}{L_\delta};$$

Уравнения (1) и (2) есть совместные уравнения синхронного генератора в относительных единицах.

*Дифференциальные уравнения асинхронного двигателя.*

Для исследования работы системы синхронный генератор – асинхронный двигатель, уравнения двигателя запишем в системе координат  $x, y$  вращающегося относительно статора со скоростью  $\omega$  ротора генератора, что упрощает расчеты (Рисунок 1).

Уравнения напряжений, электромагнитного момента и уравнение движения асинхронного двигателя в относительных единицах [3-5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\underline{\psi}_x}{d\tau} &= \underline{u}_x - \underline{\omega} \cdot \underline{\psi}_{y1} - \underline{r}_1 \cdot \underline{i}_{x1}; \quad \frac{d\underline{\psi}_{\delta 2}}{d\tau} = (\underline{\omega} - \underline{\omega}_a) \cdot \underline{\psi}_{\delta 2} - \underline{r}_2 \cdot \underline{i}_{\delta 2}; \\ \frac{d\underline{\psi}_y}{d\tau} &= \underline{u}_y + \underline{\omega} \cdot \underline{\psi}_{x1} - \underline{r}_1 \cdot \underline{i}_{y1}; \quad \frac{d\underline{\psi}_{\delta 2}}{d\tau} = (\underline{\omega} - \underline{\omega}_a) \cdot \underline{\psi}_{\delta 2} - \underline{r}_2 \cdot \underline{i}_{\delta 2}; \\ \frac{d\underline{\psi}_{y2}}{d\tau} &= (\underline{\omega} - \underline{\omega}_\delta) \cdot \underline{\psi}_{x2} - \underline{r}_2 \cdot \underline{i}_{y2}; \quad \underline{\dot{I}}_a = \frac{1}{\underline{\omega}} \cdot \underline{\delta}_\mu \cdot (\underline{i}_{x1} \cdot \underline{i}_{\delta 2} - \underline{i}_{x2} \cdot \underline{i}_{\delta 1}) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\underline{M}_\delta - \underline{M}_c = H_{j\delta} \frac{d\underline{\omega}_\delta}{d\tau}$$

$$\underline{U}_x = \frac{U_x}{U_\delta}; \quad \underline{U}_y = \frac{U_y}{U_\delta}; \quad \underline{\psi}_x = \frac{\psi_x}{\psi_\delta}; \quad \underline{\psi}_y = \frac{\psi_y}{\psi_\delta}; \quad \underline{i}_{x1} = \frac{i_{x1}}{I_\delta};$$

где

$$\underline{i}_{y1} = \frac{i_{y1}}{I_\delta}; \quad \underline{r}_1 = \frac{r_1}{Z_\delta}; \quad \underline{\psi}_{x2} = \frac{\psi_{x2}}{\psi_\delta}; \quad \underline{\psi}_{y2} = \frac{\psi_{y2}}{\psi_\delta}; \quad \underline{i}_{x2} = \frac{i_{x2}}{I_\delta};$$

$$\underline{i}_{y2} = \frac{i_{y2}}{I_\delta}; \quad \underline{\omega}_\delta = \frac{\omega_\delta}{\omega_\delta}; \quad \underline{r}_2 = \frac{r_2}{Z_\delta}; \quad \underline{M}_\delta = \frac{M_\delta}{M_\delta}; \quad \underline{M}_c = \frac{M_c}{M_\delta}; \quad \underline{x}_\mu = \frac{x_\mu}{Z_\delta}; \quad \underline{H}_{j\delta} = \frac{J_\delta \omega_\delta^2}{p_\delta M_\delta}.$$

Аналогично запишем механическую характеристику рабочего органа

$$\underline{M}_c = \underline{M}_{c0} - (\underline{M}_{cH} - \underline{M}_{c0}) \left( \frac{\underline{\omega}_\delta}{\underline{\omega}_{\delta H}} \right)^x, \quad (4)$$

где  $\underline{M}_c = \frac{M_c}{M_\delta}$ ;  $\underline{M}_{co} = \frac{M_{co}}{M_\delta}$ ;  $\underline{M}_{cn} = \frac{M_{cn}}{M_\delta}$ ;  $\underline{\omega}_{\partial n} = \frac{\omega_{\partial n}}{\omega_\delta}$ .

Уравнения потокосцеплений

$$\left. \begin{aligned} \underline{\psi}_{x1} &= \underline{L}_{x1} \cdot \underline{i}_{x1} + \underline{M}_{Aa} \cdot \underline{i}_{x2}; \\ \underline{\psi}_{y1} &= \underline{L}_{x1} \cdot \underline{i}_{y1} + \underline{M}_{Aa} \cdot \underline{i}_{y2}; \\ \underline{\psi}_{x2} &= \underline{L}_{x2} \cdot \underline{i}_{x2} + \underline{M}_{Aa} \cdot \underline{i}_{x1}; \\ \underline{\psi}_{y2} &= \underline{L}_{x2} \cdot \underline{i}_{y2} + \underline{M}_{Aa} \cdot \underline{i}_{y1}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $\underline{L}_{x1} = \frac{L_{x1}}{L_\delta}$ ;  $\underline{L}_{x2} = \frac{L_{x2}}{L_\delta}$ ;  $\underline{M}_{Aa} = \frac{M_{Aa}}{L_\delta}$ .

Полученные системы (3)...(5) описывают электромеханические переходные процессы асинхронного двигателя в системе относительных единиц.

Уравнения связи в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_x &= \underline{U}_d - r_l \underline{i}_{x1} - \frac{d\underline{\psi}_{xl}}{dt}; \\ \underline{U}_y &= \underline{U}_q - r_l \underline{i}_{y1} - \frac{d\underline{\psi}_{yl}}{dt}, \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{\psi}_{xl} &= \underline{L}_l \underline{i}_{x1}; \\ \underline{\psi}_{yl} &= \underline{L}_l \underline{i}_{y1}, \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\underline{i}_d = \sum_{k=1}^n \underline{i}_{x1}^{(k)}; \quad \underline{i}_q = \sum_{k=1}^n \underline{i}_{y1}^{(k)}, \quad (8)$$

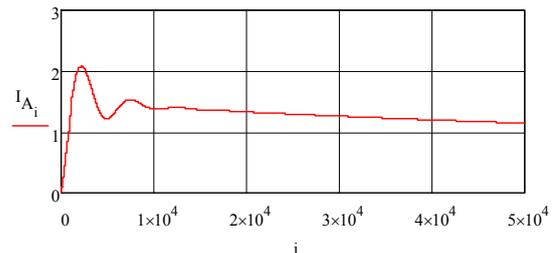
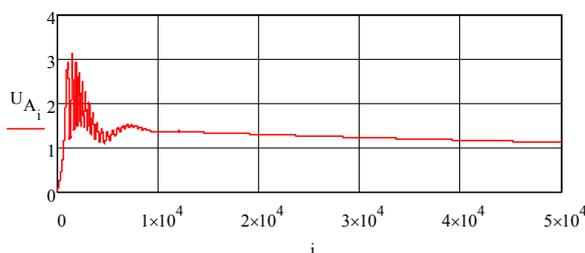
где  $\underline{\psi}_{xl} = \frac{\psi_{xl}}{\psi_\delta}$ ;  $\underline{\psi}_{yl} = \frac{\psi_{yl}}{\psi_\delta}$ ;  $\underline{r}_l = \frac{r_l}{Z_\delta}$ ;  $\underline{L}_l = \frac{L_l}{L_\delta}$ .

## Выводы

Для конкретных расчетов, полученные уравнения подвергаем преобразованиям путем исключения из них потокосцеплений, т.е. за переменную состояния системы принимаем ток, поскольку другим путем записать систему в явном виде не удастся [6-9].

В результате получаем графики изменения тока, напряжения, момента и скорости двигателя во времени, на основе которых можно провести оценку процессов в системе (рисунок 2).

Таким образом, системы (9)...(13) являются уравнениями переходных процессов системы автономного электропривода и позволяют изучить динамику системы в различных режимах работы с учетом взаимного влияния элементов – синхронный генератор, асинхронные двигатели и рабочие органы.



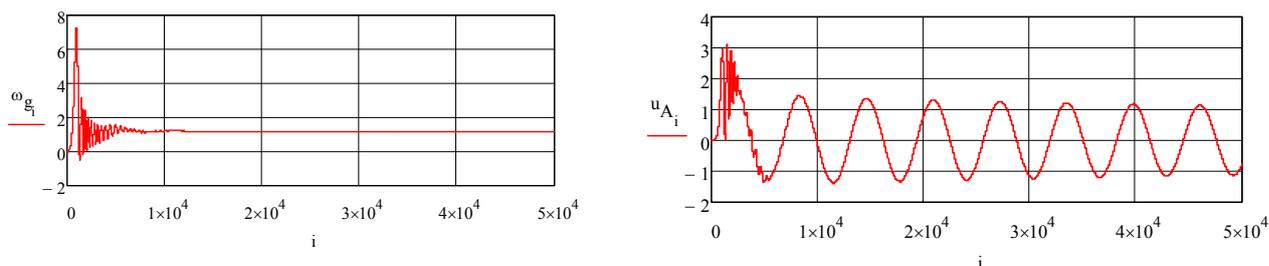


Рисунок 2 – Графики изменения тока, напряжения, момента и скорости двигателя во времени

### Литература

1. *Трецов И.И.* Электромеханические процессы в машинах переменного тока. - Л.: Энергия, 1980. - 344 с.: ил.
2. *Кацман М.М.* Электрические машины. - М.: Энергоиздат, 2000. - 494 с.: ил.
3. *Mouni E., Tnani S., Champenois G., 2006.* Comparative study of three modelling methods of synchronous generator. IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on. 6-10 Nov. 2006. Conference Publications. p.1551-1556.
4. *Veltman A., 2007.* Fundamentals of Electrical Drives./ Andre Veltman, Duco W.J. Pulle and RikW.DeDoncker // Springer, 345 p.
5. *Hamid A.T., 2004.* Handbook of Electric Motors. / Hamid A.Toliyat, Vilas D.Nene, John R.Brauer. // Taylor & Francis Group, LLC. 850 p.
6. *Постников И.М.* Обобщенная теория переходные процессы электрических машин.- М.: Высш. школа.-1975. -184 с.: ил.
7. *Важнов А.И.* Основы теории переходных процессов синхронной машины. –Л.: Госэнергоиздат.-1980. -378 с.: ил.
8. *Важнов А.И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. –Л.: Энергия.-1980.-256 с.: ил.
9. *Сипайлов Г.А., Лоос А.В.* Математическое моделирование электрических машин (АВМ) – М.: Высш. школа.-1980. -176 с.: ил.

Есимханов С.Б., Сапа В.Ю., Шыныбай Ж.С.

### ДЕРБЕС ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНДЕГІ ӨТПЕЛІ ҮДЕРІСТЕРДІ ТЕОРИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

*Аңдатпа* Синхронды генератор мен асинхронды қозғалтқыштың дифференциалды теңдеулері, сонымен қатар, жалғайтын кабельдер параметрлерін ескеретін байланыс теңдеулері құрастырылды.

Дербес электр жетек жүйесінің өтпелі үдерістерінің теңдеулер жүйесі салыстырмалы бірліктерде құрастырылды. Олар жүйенің әртүрлі режимдеріндегі динамикасын зерттеуге мүмкіндік береді. Осы кезде күй жағдайының айналымы ретінде ток қабылданған.

Сандық тәжірибелер арқылы математикалық моделі арқылы электр жетек жүйесіндегі өтпелі үдерістердің талдауы жүргізілді. Модельдеу жобаланған дербес электр жетек жүйесінің жұмыс істеу қабілеттілігін көрсетті.

*Кілт сөздер:* дербес электр жетегі, өтпелі үдерістер, синхронды генератор, асинхронды қозғалтқыш, модельдеу, математикалық моделі, дифференциалдық теңдеулер.

## THEORETICAL RESEARCH TRANSIENTS IN INDEPENDENT ELECTRIC DRIVE

*Abstract* Differential equations composed of a synchronous generator and induction motor, as well as the coupling equations that take into account the parameters of connecting cables.

In relative terms drawn up a system of equations of transients autonomous electric system, which allows to study the dynamics of the system in various modes. Thus for the current state variable passed.

By conducting numerical experiments using mathematical model analysis of transients in the motor drive system. The simulation showed capacity designed system of autonomous asynchronous electric.

*Keywords:* self-contained electric, transients, synchronous generator, induction motor, simulation, mathematical model, differential equations.

ӘОЖ 543. 422. 25.,

**Ильясова Г.У., Бектенов Н.А., Сейілханов Т.М.**

*Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті*

## МҰНАЙ ӨНІМДЕРІНІҢ КОМПОНЕНТТІК ҚҰРАМЫН ЯМР-СПЕКТРОСКОПИЯ ӘДІСІМЕН АНЫҚТАУ

### **Аңдатпа**

Мақалада мұнай өнімдерінің толық компоненттік құрамын ядролық магниттік резонанс (ЯМР) спектроскопия әдісімен анықтау қарастырылған. Бұл жұмыста зерттеу нысаналары ретінде қоймалық мұнай, лак және битум алынып, мұнай өнімдерінің фракциялық құрамын зерттеудің негізгі әдісі  $^1\text{H}$  және  $^{13}\text{C}$  ядроларындағы бір өлшемді ЯМР спектроскопия келтірілген.

*Кілт сөздер:* Ядролық магниттік резонанс (ЯМР) спектроскопия, лак, битум, қоймалық мұнай, протондық спектр, сигналдар мультиплеттілігі, химиялық ығысу.

### **Эксперименттік бөлім**

ЯМР-дың протондық және көміртектік спектрлерін Жапонияда өндірілген «Jeol» компаниясының JNN-ECA 400 (жиілігі 400 және 100 МГц) спектрометрінде дейтерийленген хлороформда  $\text{CDCl}_3$  түсірген. Химиялық ығысулар еріткіштің көміртектің қалдық протондары мен атомдары сигналдарына қатысты өлшенген. Сигналдарды зерделеу үшін Delta (Jeol) бағдарламасын пайдаланды.

### **Нәтижелері және оларды талқылау**

Мұнай өнімдері кең аясының ЯМР-профильдерін зерттеу [1, 2, 4] қаныққан, қанықпаған және ароматты компоненттердің көміртек протондары мен атомдары сигналдарының резонансқа ұшыраудың негізгі заңдылықтарын табуға мүмкіндік береді (1-кесте). Таңдап алынған нысаналардың протондық спектрлерін салыстырмалы талдау қоймалық мұнай және битум жағдайында ұқсас көріністі көрсетті (1-, 2-сурет). Берілген үлгілердің  $^1\text{H}$  спектрлері сапалық ұқсас және оларда сигналдардың 3 топтары болады. Қаныққан көмірсутектердің (КС) метилдік протондары 0-1 м.д аймағында байқалады. Сондай-ақ спектрдің берілген диапазонында  $\gamma$ - немесе ароматты жүйедегі алкил орынбасарының алысырақ орындарында орналасқан  $\text{CH}_3$ -топтары резонансқа ұшырайды. Химиялық ығысуы 1,24 м.д. болатын жоғары қарқынды сигнал алифатты КС-тің метилден және метин топтары протондарының көп мөлшерде екендігін дәлелдейді. Сонымен қатар